



Université
de Liège

Faculté des Sciences

Département de Géographie

VERS UNE METHODE DE CONCEPTION DE SIG 3D COLLABORATIF

Thèse soutenue par

Rafika HAJJI

Pour l'obtention du titre de

Docteur en Sciences

Année académique 2013-2014

Membres du jury

Promoteurs : Pr. Roland BILLEN, Université de Liège
Pr. El Hassane SEMLALI, IAV Hassan II-Rabat

Président : Pr. Yves CORNET, Université de Liège

Examineurs:

- Pr. Philippe LEJEUNE, Université de Liège
- Pr. François GOLAY, EPFL
- Pr. Matthieu NOUCHER, Université de Bordeaux

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, tout d'abord, la Coopération Technique Belge d'avoir assuré le financement de cette thèse.

Mes remerciements les plus grands vont à Mr Roland BILLEN, mon promoteur de thèse, pour m'avoir accueilli au sein de l'unité de Géomatique. Je voudrais aussi le remercier pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien et pour la confiance qu'il m'a accordée durant toute la période de ma thèse. Je le remercie aussi pour ses qualités humaines et son esprit ouvert.

Je remercie Mr El Hassane Semlali, mon co-promoteur, d'avoir accepté de co-encadrer cette thèse, de la confiance qu'il m'a témoignée et de son soutien permanent.

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie le Service Public de la Wallonie, l'IGN Belgique et l'Administration Générale de la Direction du Patrimoine de m'avoir fourni les données nécessaires pour effectuer mes tests. J'exprime mes vifs remerciements à Mr Eric Bayers, Directeur de la PhotoTopographie à l'IGN, pour sa motivation et son aide précieuse à travers les conversations qu'on a eus ensemble et pour l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mon travail.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des collègues de l'unité de Géomatique que j'ai côtoyés pendant mes séjours à Liège. J'ai passé avec eux de très bons moments et j'ai beaucoup apprécié les divers échanges qu'on a eus tant au niveau professionnel qu'au niveau personnel. J'ai une pensée particulière pour mes collègues de bureau Nadia et Jean Paul que je remercie pour leur gentillesse et leur bonne humeur quotidienne. Je remercie également Mr Donnay, Marc, Marie, Anna, Pierre, Christophe, Gilles, Mathieu et Cyril pour les échanges qu'on a eus.

Je remercie les personnes du laboratoire COGIT de que j'ai côtoyées pendant mon stage à l'IGN-France. Je remercie Mr Sébastien Mustière de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et d'avoir facilité mon intégration au sein de son équipe. Je remercie particulièrement Julien pour m'avoir facilité le séjour et pour son aide précieuse dans mon travail de recherche. Je remercie également Nathalie, Charlotte, Carmen, Anna-Maria et Mme Dominique Laurent pour les conversations fructueuses qui m'ont beaucoup aidé à progresser dans mon travail.

Je remercie les membres de ma famille pour leur aide et leur soutien. Particulièrement mon père qui m'a donné confiance et ma mère qui m'a toujours couvert de sa tendresse. Je remercie aussi mes sœurs pour leur soutien permanent.

Je dédie tout particulièrement cette thèse à mon mari pour son soutien et son encouragement durant toute la thèse. Je le remercie d'avoir supporté notre éloignement durant les longs séjours que j'ai faits en Belgique.

RESUME

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) capables de gérer les données tridimensionnelles sont indispensables à de nombreux secteurs d'activités. Cependant, les contraintes autour de la 3D sont multiples et les solutions SIG 3D commerciales présentent encore des lacunes en matière de gestion des données 3D. D'un autre côté, l'acquisition des données géographiques 3D de référence et leur tenue à jour posent des contraintes de coût et d'interopérabilité qui dépassent souvent les capacités d'un seul organisme. Dans ce contexte, la collaboration est sollicitée pour faire face à ces contraintes à travers une solution SIG 3D conçue et mise en place dans un cadre de collaboration entre plusieurs organismes, basé sur un partage des coûts, des ressources et des expériences, solution désignée par SIG 3D collaboratif.

La littérature du domaine adopte le concept de SIG collaboratif comme **outil de collaboration** associé aux techniques de communication pour prise de décision collective sur des problématiques spatiales. Nous avons attribué une nouvelle vision au SIG collaboratif qui le considère comme **produit de collaboration** entre plusieurs organismes en vue de répondre à plusieurs défis conceptuels, techniques et organisationnels.

Nos travaux de thèse portent sur les SIG 3D collaboratifs et s'articulent autour de deux aspects principaux régissant leur mise en place : un cadre conceptuel portant sur une méthode de conception de ces systèmes et un cadre technique répondant aux principales questions d'intégration d'informations multi sources provenant de différents organismes dans une base de données 3D collaborative.

Quant à l'aspect conceptuel, nous avons proposé une démarche de conception qui offre un cadre méthodologique flexible pour supporter le développement d'un SIG 3D collaboratif. Nous avons particulièrement étudié une composante principale du système qui porte sur la conception d'un modèle 3D collaboratif pour l'objet bâtiment qui est basé sur le standard CityGML et les recommandations de la directive européenne INSPIRE en matière d'interopérabilité des modèles 3D.

La composante technique du SIG 3D collaboratif est centrée sur la procédure d'intégration des bases de données de différents partenaires en vue d'alimenter la base de données basée sur le modèle 3D collaboratif. Dans ce contexte, nous avons proposé un processus d'intégration complète basé sur un appariement géométrique et sémantique des différentes bases de données en vue d'une fusion d'information sémantique et une extraction des mises à jour des données géométriques. Le schéma de la base de données résultant de la fusion d'information a été ensuite traduit selon les spécifications du schéma du CityGML, pour être importé dans la base de données collaborative.

Mots clés : SIG 3D, SIG 3D collaboratif, collaboration, méthode de conception, intégration

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) handling the third dimension are needed in many sectors. However, constraints around 3D are multiple and commercial 3D GIS solutions still have gaps in management of 3D data. On the other hand, acquisition and updating of 3D geographic reference data raise constraints of cost and interoperability that often exceed the capabilities of a single organization. In this context, collaboration is sought to address these constraints through a 3D GIS solution, designed and implemented within a collaborative framework between several partners, based on sharing costs, resources and experiences, solution that is designed by 3D collaborative GIS.

The literature adopts the concept of collaborative GIS as a tool for collaborative working associated with communication techniques for collective spatial decision-making. We assigned a new vision for collaborative GIS which is considered as a product of collaboration between several partners to address several conceptual, technical and organizational challenges.

Our thesis work focuses on collaborative 3D GIS and considers two main aspects governing their implementation: a conceptual framework for an approach to design these systems and a technical framework dealing with the main issues of integration of multiple data sources from different partners in a 3D collaborative database.

According to the conceptual aspect, we proposed a design approach that offers a flexible methodological framework to support the development of collaborative 3D GIS. We particularly studied a main component of the system that deals with the design of a collaborative 3D model for the building object, based on the CityGML standard and the recommendations of the European INSPIRE directive about 3D models interoperability.

The technical component of collaborative 3D GIS focuses on the process of integrating databases of different partners to supply a centralized database based on the collaborative 3D model. In this context, we proposed a complete integration process based on geometric and semantic matching of different databases for an extraction of semantic information and updating of geometric data. The database schema resulting from the information fusion is then translated according to the specifications of CityGML schema, to be imported into the collaborative database.

Keywords: 3D GIS, 3D collaborative GIS, collaboration, design method, integration

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
RESUME	3
ABSTRACT	4
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX	12
INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE1. CONCEPTS FONDAMENTAUX SUR LES SIG 3D	19
1.1 Introduction.....	19
1.2 La 3D: Revue des concepts et des technologies.....	20
1.2.1 Définition de l'objet tridimensionnel	20
1.2.2 Les Géo technologies 3D: DAO, SIG et SGBD.....	22
1.2.2.1 La 3D dans les systèmes DAO et SIG	22
1.2.2.2 . La 3D dans les SGBD spatiaux.....	23
1.3 Standardisation et interopérabilité des données 3D	24
1.4 Généralités sur les SIG 3D	29
1.4.1 Définition d'un SIG 3D	29
1.4.2 Le SIG 3D: Une solution aux limites des SIG 2D/2.5D	30
1.4.3 Le SIG 3D : Modélisation et fonctionnalités	31
1.4.3.1 Modélisation géométrique 3D	31
1.4.3.2 Les relations spatiales.....	33
1.4.3.3 Modélisation topologique 3D.....	34
1.4.3.4 Fonctionnalités et analyse spatiale 3D	36
1.4.4 Quelques projets SIG 3D dans la littérature.....	37
1.4.5 Les SIG 3D commerciaux	38
1.4.6 Stratégie de développement d'un SIG 3D	39
1.4.7 Quelques questionnements autour d'un SIG 3D.....	40
1.5 Conclusion	40
CHAPITRE2. LES APPROCHES COLLABORATIVES EN GEOMATIQUE.....	42
2.1 Introduction.....	42
2.2 La collaboration en Géomatique	42
2.2.1 Typologie des relations inter organisationnelles	42

2.2.2	Le concept de collaboration	44
2.2.3	Enjeux autour de la collaboration	45
2.3	La collaboration dans la production de l'information géographique	46
2.3.1	La culture participative en Géomatique.....	46
2.3.2	Les formes de production collaborative.....	46
2.3.2.1	Le crowdsourcing.....	46
2.3.2.2	La coproduction.....	48
2.4	Quelques formes collaboratives en Géomatique.....	49
2.4.1	Les Infrastructures de Données Spatiales (IDS).....	49
2.4.2	Les communautés de pratique (CDP).....	51
2.4.3	La géocollaboration	52
2.4.4	Les SIG Collaboratifs	54
2.4.4.1	Des SIG intra-organisationnels...Vers des SIG collaboratifs	54
2.4.4.2	Les concepts de SIG Participatif, SIG collaboratif dans la littérature	55
2.4.5	Le SIG collaboratif : notre propre vision.....	57
2.5	Conclusion	58
CHAPITRE3. LE SIG 3D COLLABORATIF: ENJEUX ET PERSPECTIVES.....		60
3.1	Introduction.....	60
3.2	Le SIG 3D collaboratif: Une solution à enjeux multiples	60
3.3	Le SIG 3D collaboratif: un système multidimensionnel	62
3.3.1	La composante collaborative	62
3.3.2	La composante conceptuelle.....	64
3.3.3	La composante technique	65
3.4	Architecture générale d'un SIG 3D collaboratif	66
3.5	Questions conceptuelles et techniques	67
3.5.1	Le Design d'un modèle 3D collaboratif	67
3.5.2	L'intégration des données	69
3.5.3	L'appariement	72
3.5.3.1	L'appariement : un outil pour répondre à plusieurs besoins.....	72
3.5.3.2	Les types d'appariement	73
3.5.3.3	Les critères d'appariement et les mesures associées	74
3.5.4	Le reengineering des données	77
3.6	Conclusion	77
CHAPITRE4. LE SIG 3D COLLABORATIF: ASPECTS CONCEPTUELS		79

4.1	Introduction.....	79
4.2	Méthodes et formalismes de conception pour les applications géomatiques	80
4.2.1	Les formalismes.....	80
4.2.2	Les méthodes conceptuelles	81
4.3	Le besoin d'une méthode de conception pour un SIG 3D collaboratif	83
4.4	La méthode: Principes et type d'approche	84
4.5	La démarche méthodologique	86
4.5.1	La Pré-collaboration	87
4.5.1.1	Les activités de coordination.....	88
4.5.1.2	Les activités de conception collaborative	90
4.5.1.3	Les activités d'évaluation	91
4.5.2	La Sensibilisation	92
4.5.3	La Co-Définition	93
4.5.3.1	Le Référentiel Collaboratif 3D	93
4.5.3.2	Le projet SIG 3D.....	94
4.5.4	La Co-Analyse	97
4.5.4.1	Le Schéma Directeur.....	97
4.5.4.2	L'Etude de Faisabilité.....	98
4.5.4.3	L'Etude Analytique	98
4.5.5	La Co-Réalisation	100
4.5.5.1	L'Etude conceptuelle	101
4.5.5.2	Le Projet Pilote	102
4.5.5.3	La Conception.....	102
4.5.5.4	L'Etude technique.....	103
4.5.6	L'Implantation et la mise en service.....	104
4.5.7	La Co-Evaluation	105
4.6	Conclusion	107
CHAPITRE5. LE SIG 3D COLLABORATIF: ASPECTS TECHNIQUES		109
5.1	Introduction.....	109
5.2	Les aspects techniques.....	109
5.3	Le projet Pilote	110
5.3.1	Contexte et objectifs	110
5.3.2	Organigramme méthodologique.....	111
5.4	Le modèle 3D collaboratif	112

5.4.1	Introduction.....	112
5.4.2	Les besoins	113
5.4.3	La modélisation	114
5.4.3.1	Modélisation conceptuelle.....	114
5.4.3.2	Modélisation Logico-Physique	117
5.5	Les modèles existants.....	121
5.6	L'intégration des bases de données	124
5.7	Intégration des BD vers un schéma intégré	125
5.7.1	Introduction.....	125
5.7.2	Le processus d'intégration	125
5.7.2.1	La pré-intégration: Analyse des conflits	126
5.7.2.2	L'appariement: choix de l'approche.....	129
5.7.2.3	L'appariement : Expérimentation et évaluation	136
5.7.2.4	La fusion d'information	145
5.7.3	Synthèse	148
5.8	Traduction du schéma intégré vers le schéma Cible.....	148
5.8.1	Interpolation des hauteurs et reconstruction de la 3D.....	149
5.8.2	Traduction selon le schéma du CityGML.....	151
5.8.3	Import dans la Base de Données collaborative.....	158
5.9	Conclusion	159
CHAPITRE6. BILAN ET PERSPECTIVES		161
6.1	Introduction.....	161
6.2	Bilan.....	161
6.2.1	L'aspect conceptuel.....	161
6.2.1.1	Le concept de SIG 3D collaboratif	161
6.2.1.2	La démarche de conception	162
6.2.1.3	Le modèle 3D collaboratif	163
6.2.2	L'aspect technique	164
6.3	Perspectives.....	167
6.3.1	Perspectives conceptuelles	167
6.3.2	Perspectives techniques.....	167
CONCLUSION GENERALE.....		170
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		172

LISTE DES FIGURES

<i>Fig1.1.</i> (b) : La conception de la 3D selon Bentley; (a) : La conception de la 3D selon Esri..	21
<i>Fig1.2</i> Représentation 2.5D correspondant à une entité 3D	22
<i>Fig1.3</i> Extraction d'une représentation 2.5D à partir d'une représentation 3D	22
<i>Fig1.4.</i> Les principaux modules thématiques du CityGML (Kolbe, 2009)	25
<i>Fig1.5.</i> Les cinq niveaux de détails définis par CityGML (Gröger et al, 2008)	26
<i>Fig1.6.</i> Représentation spatiale d'un bâtiment en Lod0 et le diagramme UML d'instance associée (Gröger et Plümer, 2012).....	26
<i>Fig1.7.</i> Relations entre les modèles sémantiques et géométriques du CityGML.....	27
<i>Fig1.8.</i> Connexion topologique explicite entre deux solides (Gröger et al, 2008).....	27
<i>Fig1.9.</i> Relation entre CityGML, IFC et VDI3805 (KIT, 2011).....	28
<i>Fig1.10.</i> Le modèle IFC	28
<i>Fig1.11.</i> Différentes représentations sémantiques d'un bâtiment selon IFC (Figure gauche) et CityGML (Figure droite) (Nagel et al, 2009)	28
<i>Fig1.12</i> Non unicité de la représentation en CSG (De La Losa, 2000).....	32
<i>Fig1.13</i> Arbres Octree associés à des structures cubiques subdivisées en voxels (Koussa, 2011).....	33
<i>Fig1.14</i> Exemple d'un modèle TIN 3D (Rahman et al, 2008).....	33
<i>Fig1.15</i> Représentation surfacique par la méthode B-Rep	33
<i>Fig1.16</i> Représentation d'une surface par la méthode NURBS	33
<i>Fig1.17</i> Matrice des 9 intersections (Egenhofer et Herring, 1990)	34
<i>Fig1.18</i> Schéma conceptuel topologique de l'ISO 19107.....	35
<i>Fig2.1.</i> Evolution des relations inter organisationnelles vers la collaboration.....	44
<i>Fig2.2.</i> Visualisation 3D dans OSM-3D (OSM-3D, 2013).....	47
<i>Fig2.3.</i> Les composantes d'une IDS	50
<i>Fig2.4.</i> Interactions entre le public et les données dans le cadre d'une IDS	50
<i>Fig2.5.</i> Objectifs opérationnels autour des IDS et des CDP (Noucher, 2006)	52
<i>Fig2.6.</i> Evolution des formes collaboratives vers une Géocollaboration (Noucher, 2009).....	53
<i>Fig2.7.</i> Représentation du SIG sous forme d'un modèle en couches (Joliveau, 2004)	54
<i>Fig2.8.</i> Structure hiérarchique du domaine de la recherche comportant le SIG collaboratif ..	56
<i>Fig3.1.</i> Composantes d'un SIG 3D collaboratif	62
<i>Fig3.2.</i> La dimension collaborative du projet.....	63
<i>Fig3.3.</i> La collaboration est un processus évolutif	64
<i>Fig3.4.</i> Dimension conceptuelle du projet.....	65
<i>Fig3.5.</i> Composante technique du projet	66
<i>Fig3.6.</i> Architecture générale d'un SIG 3D collaboratif	67
<i>Fig3.7.</i> Schéma "Buildings3D"	69
<i>Fig3.8.</i> Processus d'intégration des bases de données géographiques (Olteanu, 2008)	70
<i>Fig3.9.</i> Conflits d'intégration de bases de données géographiques (Devogele, 1997)	71
<i>Fig3.10.</i> Le processus de conflation proposé par (Yuan et Tao, 1999)	72
<i>Fig3.11.</i> Exemple d'un cas d'appariement [1-n].....	72
<i>Fig3.12.</i> Appariement des schémas dérivé de l'appariement des données (Volz, 2005).....	73
<i>Fig3.13.</i> Contexte de l'appariement des données (Olteanu, 2008)	74
<i>Fig3.14.</i> Les caractéristiques d'un objet géographique (Olteanu, 2008)	75
<i>Fig3.15.</i> Distance surfacique entre deux objets (Olteanu, 2008).....	76
<i>Fig3.16.</i> Schématisation du calcul de profondeur dans la mesure sémantique de Wu-Palmer (Adopté de Wu et Palmer, 1994)	77
<i>Fig4.1.</i> Concepts SIG couverts par le formalisme CONGOO (Miralles, 2006)	81
<i>Fig4.2.</i> Les niveaux d'abstraction et les classes de préoccupations de MECOSIG.....	82

<i>Fig4.3.</i> Les différentes étapes de la démarche MECOSIG classées par catégorie	82
<i>Fig4.4.</i> Perspectives d'implantation des technologies géomatiques	85
<i>Fig4.5.</i> Approche proposée pour l'implantation d'un SIG 3D collaboratif (Inspiré de Rajabifard et al. (2002)).....	86
<i>Fig4.6.</i> Démarche méthodologique : exemple de cheminement	87
<i>Fig4.7.</i> La Pré-Collaboration.....	88
<i>Fig4.8.</i> Le Groupware.....	89
<i>Fig4.9.</i> Formes de conception collaborative du système	91
<i>Fig4.10.</i> Les étapes de la Co-Définition du projet	95
<i>Fig4.11.</i> Le Schéma Directeur	98
<i>Fig4.12.</i> L'Etude de Faisabilité	99
<i>Fig4.13.</i> Etude analytique sur la classe «Données»	99
<i>Fig4.14.</i> Etude analytique sur la classe «Interopérabilité»	100
<i>Fig4.15.</i> Etude conceptuelle et Conception avec Projet Pilote	101
<i>Fig4.16.</i> Le Projet Pilote	102
<i>Fig4.17.</i> La conception	103
<i>Fig4.18.</i> Le Benchmark	104
<i>Fig4.19.</i> L'Etude technique.....	104
<i>Fig4.20.</i> Questions autour de l'évaluation.....	105
<i>Fig4.21.</i> Les approches d'évaluation	107
<i>Fig5.1.</i> Les étapes de l'organigramme méthodologique.....	112
<i>Fig5.2.</i> Generic Conceptual Model – Base Types (Extrait de la directive INSPIRE).....	116
<i>Fig5.3.</i> Schéma d'application du Bâtiment selon INSPIRE	117
<i>Fig5.4.</i> Le MCD du modèle 3D collaboratif pour le bâtiment.....	118
<i>Fig5.5.</i> Fenêtre d'installation du script «Create_DB.sql»	120
<i>Fig5.6.</i> Représentation géométrique du bâtiment dans le modèle ITGI de l'IGN	122
<i>Fig5.7.</i> Schéma UML du topic "Construit".....	123
<i>Fig5.8.</i> Base de données centralisée.....	124
<i>Fig5.9.</i> Etapes du processus d'intégration.....	126
<i>Fig5.10.</i> Les deux modes de représentation de la géométrie du bâtiment	127
<i>Fig5.11.</i> Conflit de données dû à deux saisies différentes du même bâtiment.....	129
<i>Fig5.12.</i> Représentation par généralisation d'un ensemble de bâtiments par une seule entité géométrique	129
<i>Fig5.13.</i> Les étapes du processus d'appariement proposé par Belhadj (2001).....	130
<i>Fig5.14.</i> Etapes de l'appariement multi critère proposé par (Olteanu, 2008).....	131
<i>Fig5.15.</i> Processus global d'appariement de schémas de BD géographiques fondé sur des valeurs d'attributs et une ontologie de support (Abadie, 2012)	132
<i>Fig5.16.</i> Ontologie de support (visualisée sous Protégé).....	133
<i>Fig5.17.</i> Ontologie établie pour la base de données du PICC (visualisée sous Protégé)	134
<i>Fig5.18.</i> Ontologie établie pour la base de données de l'IGN (visualisée sous Protégé).....	134
<i>Fig5.19.</i> Ontologie établie pour la base de données de l'AGDP (visualisée sous Protégé).135	
<i>Fig5.20.</i> Le processus d'appariement adopté	135
<i>Fig5.21.</i> Cas de lien invalide (distance surfacique = 0.43 et similarité sémantique = 0.2) ...	138
<i>Fig5.22.</i> Cas de lien invalide (distance surfacique = 0.91 et similarité sémantique = 1)	138
<i>Fig5.23.</i> Nombre de liens simples et multiples par variation du poids sémantique.....	138
<i>Fig5.24.</i> Nombre de liens multiples en fonction du poids accordé au critère sémantique....	139
<i>Fig5.25.</i> Cas de liens invalides générés dans le cas d'une grande similarité sémantique entre deux candidats à l'appariement.....	140
<i>Fig5.26.</i> Répartition de la cardinalité des liens en fonction du taux d'inclusion (Cas PICC-IGN)	140
<i>Fig5.27.</i> Répartition de la cardinalité des liens en fonction du taux d'inclusion (Cas PICC-AGDP).....	140
<i>Fig5.28.</i> Lien invalide dû à une différence significative des surfaces des entités appariées	141

<i>Fig5.29.</i> Cas d'appariement avec conflit d'orientation et de forme géométrique	141
<i>Fig5.30.</i> Matrice de confusion.....	142
<i>Fig5.31.</i> Cas d'un lien invalide dû à une segmentation de la BDCComp	145
<i>Fig5.32.</i> Processus d'interpolation des hauteurs des bâtiments	149
<i>Fig5.33.</i> Exemple d'un transformateur FME	150
<i>Fig5.34.</i> Extrusion des bâtiments dans FME	151
<i>Fig5.35.</i> Sélection des surfaces thématiques du bâtiment ("Roof", "Ground", "Wall")	151
<i>Fig5.36.</i> Transformateurs: «AttributeSplitter», «ListIndexer» et «AttributeRenamer».....	152
<i>Fig5.37.</i> Agrégation sur base de l'identifiant «gml_id»	153
<i>Fig5.38.</i> Création des attributs «citygml_lod_name» et «citygml_feature_role».....	154
<i>Fig5.39.</i> L'attribut «gml_id» renommé en «gml_parent_id»	154
<i>Fig5.40.</i> Ajout du Writer "Surface type" pour les surfaces thématiques	155
<i>Fig5.41.</i> Organigramme de traduction	156
<i>Fig5.42.</i> Organigramme de traduction (suite)	157
<i>Fig5.43.</i> Visualisation du fichier CityGML dans « LandXplorer CityGML Viewer »	158
<i>Fig5.44.</i> Connexion à la base de données.....	159
<i>Fig5.45.</i> Import du fichier CityGML dans la base de données.....	159

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tab1. 1.</i> Comparaison entre les formats 3D (adopté de Stoter et al, 2011)	29
<i>Tab3. 1.</i> Exemple de classes à apparier (Devogele, 1997).....	74
<i>Tab4. 1.</i> Classification des systèmes CSCW (Keita, 2007).....	89
<i>Tab4. 2.</i> Matrice SWOT (Hay et Castilla, 2006)	92
<i>Tab5.1.</i> Caractéristiques des données utilisées	111
<i>Tab5.2.</i> Propriétés de l'identifiant unique (Mensuration Suisse)	116
<i>Tab5.3.</i> Comparaison entre les différents modèles logiques (Koussa, 2011).....	119
<i>Tab5.4.</i> Comparaison entre les SGBD Oracle, MySQL et PostgreSQL (Koussa, 2011)	119
<i>Tab5.5.</i> Critères de qualité pour l'appariement avec leurs équations (Boudet, 2007)	143
<i>Tab5.6.</i> Evaluation des résultats d'appariement en termes de précision et de rappel-Cas PICC-AGDP	143
<i>Tab5.7.</i> Evaluation des résultats d'appariement en utilisant les critères de qualité définis dans la table 5.5 (Cas PICC-AGDP).....	144
<i>Tab5.8.</i> Evaluation des résultats d'appariement en termes de précision et de rappel-Cas PICC-IGN.....	144
<i>Tab5.9.</i> Evaluation des résultats d'appariement en utilisant les critères de qualité définis dans la table 5.5 (Cas PICC-IGN)	144
<i>Tab5.10.</i> Les rôles géométriques «Citygml_lod_name» associés aux entités «CityGML Feature Type»	153

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, la donnée 3D constitue un besoin crucial pour la modélisation de l'espace géographique. La planification urbaine, la représentation du cadastre, la gestion de l'environnement, les télécommunications, les opérations de secours, les applications militaires, etc. sont autant d'applications où l'intégration de la troisième dimension dans les processus de représentation et d'analyse représente une plus-value indéniable.

En sciences géomatiques, un grand intérêt est porté à la modélisation géométrique représentant les caractéristiques spatiales de la réalité. Le monde qui nous entoure étant tridimensionnel, sa représentation par un modèle 3D rend la perception et la reconnaissance des objets plus faciles et plus intuitives. Cependant, au-delà de l'aspect visuel de l'espace avec plus de réalisme, l'utilisation de la troisième dimension offre de nombreux avantages comme la représentation de certains objets et relations entre eux qui seraient difficiles à modéliser en 2D. Prenons par exemple le cas du cadastre vertical, où les cartes et les plans cadastraux en 2D ne permettent pas de représenter efficacement les structures multi niveaux ainsi que les droits qui s'y rattachent dans le cas des copropriétés (Stoter, 2004).

Si l'utilité de la 3D fait relativement consensus, la question de sa représentation par des modèles géométriques et topologiques 3D ainsi que des opérateurs spatiaux pour l'analyser et l'interroger est loin d'être un acquis, ceci en dépit du nombre de recherches qui ont traité le sujet de la 3D. Pour construire, stocker, analyser et visualiser des modèles 3D, différents systèmes performant à des niveaux différents de la 3D. En effet, les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) sont reconnus pour leurs fonctionnalités avancées en modélisation géométrique. Cependant, la performance dans l'analyse spatiale est attribuée aux SIG, même si ces derniers peinent encore à maîtriser cette question. Alors que les domaines des SIG et des SGBD orientent leurs développements vers l'amélioration des fonctionnalités techniques en 3D, les organismes de standardisation et les actions internationales travaillent sur la standardisation des données 3D et les règles de leur interopérabilité. Le standard CityGML et la directive européenne INSPIRE sont des exemples potentiels de ces orientations.

Les SIG 3D sont des systèmes sollicités pour une gestion optimale des données 3D. Cependant, leur développement se heurte à plusieurs problèmes conceptuels, techniques et organisationnels. Dans ce contexte, nous pouvons soulever la question suivante : est ce que les SIG 3D continueraient à se développer selon les processus traditionnels, où chaque organisme prend la charge de développement d'une solution SIG 3D qui répond à ses propres besoins? A notre vue, les méthodes traditionnelles se trouvent biaisées face à de nombreuses contraintes qui se posent dans le contexte de la gestion de l'information 3D dans un cadre interopérable. Ainsi, de nouvelles pratiques doivent être mises en place pour le développement des SIG 3D en repensant les méthodes et les outils. En effet, la collaboration dans le développement d'un SIG 3D est une solution potentielle qui permet de maîtriser plusieurs questions conceptuelles, techniques et organisationnelles et les solutionner dans un cadre collaboratif, à travers un partage des coûts de production et de mise à jour des référentiels géographiques 3D, des connaissances et des ressources. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse consiste à faire un mariage entre les deux domaines : les SIG 3D et la collaboration à travers la proposition du concept de SIG 3D collaboratif et à étudier le cadre méthodologique conceptuel et technique pour sa mise en place.

1. Contexte et problématique

1.1. Contexte

La modélisation 3D de l'espace urbain occupe une place prépondérante dans de nombreuses applications utilisant l'information géographique. Les potentialités de la 3D sont très prometteuses et vont au-delà de son usage restrictif comme un simple produit de visualisation et d'animation. Quels que soient les usages, la mise à disposition d'un fond de plan tridimensionnel devient un besoin crucial qui impose aux organismes producteurs des données de référence d'orienter les développements vers l'acquisition de référentiels géographiques 3D.

Les SIG se révèlent être des outils puissants pour la gestion des phénomènes spatiaux. Ils doivent maintenant s'aligner sur le besoin en donnée tridimensionnelle et offrir des fonctionnalités avancées et propres à un espace 3D. Le problème ne se réduit pas à une simple extension des solutions SIG 2D par l'ajout d'un attribut sur l'altitude, mais requiert un travail consistant de modélisation, de représentation et de stockage dans un espace tridimensionnel. La question du SIG 3D n'est pas entièrement maîtrisée et bon nombre d'aspects y relatifs sont encore dans le champ de la recherche. Les solutions commerciales disponibles se placent à mi-chemin entre les SIG 2D et les SIG 3D, solutions qualifiées de SIG 2.5D. La communauté scientifique s'est plutôt retournée vers le développement d'applications ad hoc pour répondre à des besoins spécifiques. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont entrepris l'étude de différents aspects sur les SIG 3D, notamment la représentation et le stockage des données 3D, les besoins relatifs à la topologie en 3D, certains concepts d'analyse spatiale 3D, etc.

Avec l'évolution des méthodes du Géoweb, qualifiées de néogéographiques, la production prend une nouvelle forme de pratique sociale et de contribution volontaire qui s'inscrit dans une logique de travail participatif, apportant ainsi un changement radical dans les modalités établies de production de l'information géographique. La production des données 3D a fait son apparition dans le web collaboratif. L'application OpenStreetMap-3D est un exemple type de plateforme web à travers laquelle les internautes produisent volontairement l'information géographique, connue sous l'acronyme VGI (Volunteered Geographic Information). Cependant, les solutions web restent généralistes et tendent à diluer l'information spécifique à chaque utilisateur. En effet, l'utilisateur se trouve paralysé par une pléthore de données hétérogènes qui ne répondent pas à ses besoins. Il s'avère donc que la donnée 3D de référence produite dans un cadre professionnel détient une grande utilité en tant qu'infrastructure géographique de base sur laquelle d'autres informations peuvent se greffer pour supporter un grand éventail d'applications.

Les données 3D de référence constituent une composante principale d'un SIG 3D. Cependant, leur production et leur tenue à jour constituent une contrainte majeure qui engendre des coûts importants dépassant souvent les budgets des organismes producteurs des référentiels géographiques. L'adoption du CityGML comme standard international pour la modélisation urbaine a largement contribué à la résolution du problème d'interopérabilité. CityGML propose une sémantique très riche et une représentation de l'espace urbain en différents niveaux de détails tout en offrant une grande flexibilité de représentation grâce à son aspect modulaire.

Les formes partenariales autour de l'information géographique se multiplient à plusieurs échelles de l'espace, mais elles sont souvent réduites à l'échange de données dans un cadre spécifique. Plusieurs organismes exerçant sur le même espace géographique détiennent chacun un patrimoine informationnel important. Les productions sont redondantes et les visions sont souvent encapsulées dans un contexte intra organisationnel. Pouvant faire partie d'une certaine action régionale, nationale ou internationale, les organismes ayant des missions juxtaposées ont intérêt à chercher un référentiel commun et homogénéiser leurs visions pour atteindre des objectifs communs. La donnée spatiale doit sortir de son cadre de création pour s'intégrer facilement dans d'autres contextes d'usage et s'affranchir de toutes les discordances sémantiques et techniques pouvant limiter son échange. Dans ce contexte, la collaboration est une pratique recommandée pour faire face à plusieurs défis qui se posent dans le domaine de la 3D. Ses enjeux sont multiples, notamment la coproduction des données 3D à travers une co définition des spécifications de modélisation et un partage des coûts de production et de mise à jour.

La collaboration est une pratique qui dépasse les autres activités partenariales dont les objectifs sont généralement ponctuels et non forcément partagés. Elle est conditionnée par une participation active et volontaire de tous les acteurs concernés pour atteindre des objectifs communs. La mise en place d'un SIG 3D collaboratif dans un cadre de collaboration entre différents organismes est une solution potentielle visant la maîtrise de plusieurs questions sémantiques et techniques rattachées à la 3D dans un cadre de co définition, de conception et de réalisation collaborative. C'est dans ce contexte multidisciplinaire impliquant les SIG 3D et la collaboration que s'inscrit notre travail de recherche qui aborde la question du SIG 3D collaboratif en tant que solution novatrice mettant la collaboration au profit du SIG 3D.

1.2. Problématique

La thématique de notre thèse se situe à la croisée de deux champs disciplinaires qui sont les SIG 3D en tant que systèmes à défis multiples et la collaboration en tant que pratique professionnelle s'inscrivant dans un cadre stratégique et offrant un référentiel d'action plus évolué que les autres formes partenariales comme la coopération et la coordination. Nous avons positionné notre recherche dans un cadre faisant un mariage entre les deux domaines en introduisant le concept de SIG 3D collaboratif.

Plusieurs contraintes organisationnelles, techniques et conceptuelles entravent la mise en place d'un SIG 3D. En parallèle, d'autres facteurs externes comme les actions internationales imposent la coordination entre les acteurs pour unifier les visions et fournir une information intégrée et homogène. Le SIG 3D collaboratif est vu comme solution novatrice ayant des impacts considérables sur l'avenir de la gestion des données 3D dans les référentiels géographiques.

La problématique générale de notre recherche est centrée sur l'aspect conceptuel du SIG 3D collaboratif en termes de méthode et de démarche à entreprendre pour mettre en place le système dans un cadre de collaboration entre organismes producteurs des données de référence. Certes, des méthodes existent pour la conception de solutions géomatiques mais ne tiennent pas compte de l'aspect collaboratif et du cadre d'interopérabilité requis pour le travail de conception. Le besoin enregistré dans ce volet justifie notre motivation de mener la recherche dans ce sens. Un autre aspect de la problématique traite la question technique

centrée sur l'intégration des solutions existantes dans un système 3D collaboratif en étudiant l'aspect spécifique lié au reengineering des données constituant les référentiels géographiques existants en vue de produire une donnée 3D de référence et l'intégrer dans une base de données 3D collaborative et interopérable.

Nous avons projeté la question de recherche sur un contexte spécifique qui concerne la production des données de référence en Belgique-Région Wallonne. En effet, plusieurs organismes, notamment l'Institut Géographique National (IGN), le Service Public de Wallonie (SPW) et l'Administration Générale de la Direction du Patrimoine (AGDP) produisent des données de référence pour répondre à des objectifs différents, donnant lieu à plusieurs bases de données divergentes en termes de qualité géométrique, sémantique et temporelle. Les relations inter organisationnelles entre les organismes précités se réduisent à des accords de partenariat centrés sur l'échange des données sources et à des actions limitées visant des objectifs ponctuels. En outre, des formes de coordination sont établies pour répondre à des sollicitations internationales comme la directive INSPIRE, notamment par la définition d'un modèle d'échange pour le thème bâtiment. Cependant, les actions entreprises manquent de vision claire et intégrée qui centre le problème sur la définition des données de référence et sont plutôt encapsulées dans un cadre technique.

La définition et la mise à disposition d'une donnée de référence qui soit interopérable est reconnue en tant que besoin potentiel. Cependant, des réticences entravent l'entreprise d'actions de collaboration stratégique dans ce sens. En effet, les visions sont ancrées dans les pratiques métiers et sont centrées sur des préoccupations intra organisationnelles. Par absence d'une vision claire, les organismes ne perçoivent pas l'utilité de l'engagement dans un projet collaboratif. Alors que le besoin en 3D est déjà établi, la plupart des organismes placent la question à un niveau de priorité secondaire. La géométrie 3D est vue comme une des géométries qui peut coexister avec d'autres formes de représentation mais qui n'est pas forcément intégrée dans un véritable modèle 3D. La question du coût et aussi la non maîtrise du domaine apportent une bonne part d'explication au problème.

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans ce cadre général portant sur la définition d'une donnée 3D commune dans un contexte de collaboration, en proposant le SIG 3D collaboratif comme forme de collaboration stratégique ayant des enjeux multiples et en abordant les questions techniques qui s'y rattachent.

2. Objectifs

A l'issue du contexte et de la problématique présentés ci-dessus, nous définissons les objectifs principaux du travail mené dans le cadre de cette thèse.

La collaboration dans la mise en place d'un SIG 3D est un processus progressif et évolutif qui requiert l'implication volontaire et effective de tous les partenaires concernés. La nature du système requiert une démarche conceptuelle permettant de maîtriser sa complexité et de fournir des lignes directrices pour sa conception et sa mise en place. Les méthodes classiques de conception qui ont été proposées pour supporter les projets de mise en place d'une solution géomatique au sein d'une organisation ne prennent pas compte de la spécificité du SIG 3D collaboratif en tant que projet portant sur plusieurs organisations et développé dans un cadre de collaboration. Pour répondre à ce besoin, nous nous sommes fixés comme premier objectif **la proposition d'une démarche conceptuelle générique pour la mise en place d'un SIG 3D collaboratif en vue d'offrir aux organisations et au**

concepteur analyste un outil pragmatique pour conception du système. Dans un cadre conceptuel théorique, nous développons des réflexions générales et nous analysons les différentes dimensions du projet et les solutions à envisager dans le cadre d'une démarche intégrée soulevant les grandes questions dans le processus de développement du SIG 3D dans un contexte collaboratif.

Pour ne pas encapsuler le SIG 3D collaboratif dans le seul contexte théorique, nous avons voulu explorer la question technique relative au projet en le plaçant dans un contexte pratique, en vue d'étudier les principales questions techniques et proposer des solutions pour les résoudre. Ainsi, **le deuxième objectif de recherche consiste à proposer, dans le cadre d'un projet pilote, un modèle 3D collaboratif pour l'objet bâtiment basé sur des besoins définis et d'autres prospectifs, et à concevoir et tester un processus d'intégration de données multi sources dans une base de données 3D collaborative basée sur le modèle 3D commun.**

3. Organisation du document

Dans la première partie du présent rapport, nous présentons un état de l'art dans lequel nous mettons l'accent sur les différents concepts qui touchent au sujet de la thèse. Celui-ci se situe à la croisée de deux champs disciplinaires : les SIG 3D et la collaboration. Nous présentons ainsi l'état de l'art en deux chapitres. Le premier chapitre intitulé: «*Concepts fondamentaux sur les SIG 3D*» aborde le concept du SIG 3D en focalisant, dans la première partie du chapitre, sur les concepts fondamentaux liés à la 3D, que nous jugeons utiles dans le contexte de cette recherche. Nous expliquons la notion de troisième dimension, les principes et les approches de modélisation géométrique et topologique 3D. Nous faisons ensuite une présentation de l'état de l'art de la 3D dans les systèmes DAO, SIG et SGBD et finalement, nous abordons la question de l'interopérabilité des données 3D. La deuxième partie du chapitre aborde les questions fondamentales sur le SIG 3D en mettant en évidence les réalisations, les difficultés et les défis. Le deuxième chapitre qui s'intitule «*La collaboration en Géomatique*» se place dans le domaine de la collaboration en l'abordant dans le contexte de la géomatique. Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la collaboration : sa définition et ses enjeux ainsi que les formes collaboratives qui marquent le champ de la Géomatique. Nous présentons particulièrement le concept de SIG participatif et de SIG collaboratif dans la littérature, et nous exposons notre propre vision autour du concept de SIG collaboratif en soulevant les principaux questionnements qui se posent pour son adoption.

Le troisième chapitre intitulé «*Le SIG 3D collaboratif : enjeux et perspectives*» présente le contexte de la recherche dans lequel nous présentons notre motivation en mettant l'accent sur les enjeux et les potentialités du SIG 3D collaboratif. Autour de cette solution, nous présentons les questions conceptuelles et techniques ainsi que les contraintes de mise en œuvre.

Dans le quatrième chapitre: «*Le SIG 3D collaboratif: Aspects conceptuels* », nous présentons la première partie de notre contribution où nous proposons un cadre conceptuel théorique pour la mise en place d'un SIG 3D collaboratif dans lequel nous analysons les composantes du projet puis nous proposons une démarche conceptuelle pour sa mise en œuvre. L'objectif est de cerner les questions principales sur l'aspect méthodologique autour de la mise en place du système. Nous introduisons le chapitre par une brève présentation de

la littérature sur les formalismes et les méthodes conceptuelles pour les SIG, en démontrant leur insuffisance face aux besoins émergents sur la gestion des données spatiales en termes d'interopérabilité et de collaboration. Nous recentrons sur le besoin d'une méthode adaptée pour conduire un projet SIG 3D collaboratif, puis nous présentons notre proposition d'une démarche conceptuelle sous la forme d'un ensemble d'étapes génériques qui soulèvent les questions méthodiques principales, et pour lesquelles nous avançons des propositions de méthodes et d'outils pour les résoudre.

Le cinquième chapitre du rapport qui s'intitule : « *Le SIG 3D collaboratif : Aspects techniques* » focalise sur les principaux aspects techniques liés au SIG 3D collaboratif dans le cadre d'un projet pilote que nous présentons en deux grandes étapes: 1) une étude analytique sur l'existant en termes de données, d'actions de collaborations, de besoins etc. Nous présentons à la lumière de cette analyse une proposition de modèle 3D collaboratif pour l'objet bâtiment ; 2) un test d'intégration des bases de données sources vers une base de données 3D collaborative établie sur base du modèle proposé dans l'étape précédente.

Dans Le sixième chapitre qui s'intitule « Bilan et Perspectives », nous récapitulons notre contribution sous forme d'un bilan et nous proposons des perspectives pour amélioration de la recherche.

CHAPITRE 1. CONCEPTS FONDAMENTAUX SUR LES SIG 3D

1.1 Introduction

La 3D a toujours été rattachée à des domaines comme la CAO (*Cartographie Assistée par Ordinateur*), la vision stéréoscopique, le graphisme 3D, les jeux vidéo, le cinéma 3D, etc. Plusieurs réalisations ont marqué le domaine de la 3D à des périodes différentes. Les années 1960 ont connu l'introduction du terme "*Computer Graphics*" qui désigne "*Infographie*" et l'apparition des courbes de Bézier qui ont été ensuite utilisées pour la modélisation en 3D des surfaces. Au début des années 1990, la 3D a commencé à se développer réellement grâce à la révolution enregistrée dans le domaine de l'informatique, notamment le développement du hardware (*processeurs, cartes graphiques accélératrices 3D, espaces disque plus performants...*) et l'évolution des produits logiciels supportant la troisième dimension. Pendant les années 2000, la 3D s'est généralisée à d'autres domaines comme les sites web, les villes en 3D, les simulations, etc. (Koussa, 2011). Aujourd'hui, l'utilité de la 3D est perçue dans un grand éventail d'applications.

La modélisation tridimensionnelle de l'espace géographique revêt une importance majeure dans bon nombre d'applications. La représentation de la composante tridimensionnelle de l'espace ne date pas d'aujourd'hui, l'homme avait toujours conscience de la notion du relief. En effet, le dessin en perspective est une technique apparue vers le XV^{ème} siècle pour représenter, sur une surface plane tout type d'objet avec une apparence tridimensionnelle. Cette technique a fait évoluer les modes de représentations vers la sauvegarde du réalisme des scènes (De La Losa, 2000). Cependant, la vue en perspective présente l'inconvénient de changer en fonction du point de vue. Elle a été délaissée au profit de la carte basée sur une projection orthogonale qui, malheureusement ne permet pas d'avoir une bonne perception de la réalité (Rahman et Pilouk, 2008). Aujourd'hui, la 3D s'attache à de multiples secteurs où elle démontre son utilité. Elle est reconnue comme besoin fondamental dans beaucoup d'applications impossibles à traiter sans la notion de volume. Cependant, le degré de son acceptation dépend fortement des apports qu'elle peut garantir par rapport aux systèmes 2D. Une restriction importante pour son implémentation est l'inertie du modèle de représentation 2D.

Les applications se distinguent selon leurs exigences en matière de structures de données nécessaires pour répondre à des besoins allant de la visualisation à l'analyse spatiale 3D. Certes, les modèles 2.5D couvrent une bonne partie d'usages en servant comme référence pour certaines applications comme les études d'impact ou la planification urbaine. Cependant, d'autres applications requièrent un modèle 3D structuré selon un niveau de granularité élevé comme le cadastre (Stoter et Oosterom, 2006); la gestion des risques dans les espaces urbains (bâtiments publics, malls, métros,..) (Lee et Zlatanova, 2008); l'analyse de la qualité visuelle de l'espace urbain à travers la présentation de la réalité virtuelle multidimensionnelle (Zhang et Zhu, 2008), etc.

Le SIG 3D s'impose comme une solution incontournable pour la gestion des données tridimensionnelles. Cependant, une véritable solution SIG 3D est loin d'être triviale et bon nombre de questions technologiques ne sont pas encore (ou partiellement) résolues comme

la modélisation 3D et le développement de fonctions d'analyse spatiale 3D qui soient aussi élaborées qu'en 2D.

Notre état de l'art s'attache, dans un premier temps, à présenter les concepts fondamentaux sur la 3D que nous jugeons utiles dans le contexte de cette recherche. Nous expliquons la notion de troisième dimension et sa pertinence par rapport aux modèles 2D et 2.5D. Nous faisons ensuite une présentation de l'état de l'art de la 3D dans les systèmes DAO, SIG et SGBD et nous abordons la question de l'interopérabilité des données 3D. La deuxième partie du chapitre présente le concept de SIG 3D en termes de définition et de besoins ainsi que les principes et les approches de modélisation géométrique et topologique 3D qui constituent un jalon important dans l'architecture d'un SIG 3D. Nous abordons ensuite les questions fondamentales sur le SIG 3D en mettant en évidence les réalisations, les difficultés et les défis.

1.2 La 3D: Revue des concepts et des technologies

1.2.1 Définition de l'objet tridimensionnel

En dépit de la grande fréquence d'usage de la 3D dans la recherche, nous jugeons encore utile d'éclaircir le concept de la 3D et mettre le point sur quelques notions fondamentales liées à la troisième dimension pour mieux percevoir ses différences par rapport aux modèles 2D et 2.5D.

- Le concept de "Dimension"

La notion de dimension n'est pas clairement définie dans la littérature (Rageul, 2007; Larrivée et al, 2005; Pouliot et al, 2006). Elle est sujette à plusieurs interprétations selon le contexte dans lequel elle est utilisée. Notamment, dans le domaine de la physique, et selon le Grand Dictionnaire Terminologique, 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*». Dans le jargon OLAP (*On Line Analytical Processing*), la notion de dimension correspond à un thème ou un axe selon lequel les données peuvent être analysées (Lachance, 2005). Il y a donc autant de dimensions que de thèmes d'analyses associés à un objet. Dans les systèmes d'information géographique, la dimension peut se rapporter à l'objet pour exprimer le nombre de directions suivant lesquelles celui-ci s'étend, ou à l'univers pour définir le nombre d'axes nécessaires pour localiser les objets dans cet univers (Rageul, 2007; Lachance, 2005), avec la règle que les objets localisés dans un univers ne peuvent pas avoir plus de dimensions que cet univers, sauf si celui-ci est lui-même un objet situé dans un autre univers ayant plus de dimensions (Larrivée et al, 2005). Selon la façon d'obtenir et de stocker l'information relative à l'axe Z, on peut distinguer deux types d'univers 3D (Lachance, 2005): 1) Un univers (2D+1D) qui correspond à un univers 2D pour lequel la troisième dimension est dérivée par drapage d'objets 2D sur un MNT et 2) Un univers 2.5D qui correspond à un univers local 2D dont l'information concernant la coordonnée Z est enregistrée dans une base de données en tant qu'attribut.

- Définition de la 3D

Les définitions attribuées à la 3D se basent soit sur la dimension de l'objet ou sur celle de l'univers. Notamment, la compagnie Esri définit une forme 3D comme suit : A three-

dimensional shape is: «a point, line, or polygon that stores x, y and z coordinates as part of its geometry. A point has one set of z-coordinates; lines and polygons have z-coordinates for each vertex» (Larrivée et al, 2005). Ainsi, un objet est considéré en 3D s'il est positionné dans un univers possédant trois dimensions (soient le X, le Y et le Z) et ce, indépendamment de la dimension de l'objet (Fig1.1a). D'autre part, la compagnie Bentley adopte une définition de la 3D en se référant à l'enveloppe englobante des objets: il y a une représentation 3D lorsque le rectangle englobant l'objet doit posséder une profondeur pour le contenir (Lachance, 2005) (Fig1.1b). Le site web Mathworld propose la définition suivante: «The dimension of an object is a topological measure of the size of its covering properties. Roughly speaking, it is the number of coordinates needed to specify a point on the object. For example, a rectangle is two-dimensional, while a cube is three-dimensional!». Ainsi, le nombre de dimensions d'un objet est le nombre de coordonnées nécessaires pour localiser de manière unique un point de cet objet.

(b)					(a)				
Objet → Rectangle englobant ↓	0D	1D	2D	3D	Objet Univers ↙	0D	1D	2D	3D
0D	●				Univers				
1D		—			1D	●	—		
2D		∪	▭		2D	●	/ ∪	▭	
3D		∩	∩	∩	3D	●	/ ∩ ∩	∩	∩

Fig1.1. (b) : La conception de la 3D selon Bentley; (a) : La conception de la 3D selon Esri

Certes, la définition de Mathworld est plus robuste du point de vue mathématique, cependant celle d'Esri présente l'avantage de pouvoir définir et implémenter un modèle 3D intégré pouvant inclure des objets de dimensions inférieures (2D/2.5D) et les gérer dans un seul système.

Au-delà de la troisième dimension, la recherche évolue vers une représentation multidimensionnelle des objets où d'autres dimensions comme le temps et l'échelle peuvent être ajoutées pour évoluer vers une modélisation 5D intégrée (espace 3D+temps+échelle) (Oosterom et Stoter, 2010).

- Modèles 3D Vs Modèles 2.5D

Les modèles 2.5D et le MNT sont des solutions intermédiaires entre la 2D et la 3D. Une représentation 2.5D est une représentation où chaque entité est décrite par ses limites 2D (coordonnées x, y) augmentées par une coordonnée Z qui peut être définie soit par rapport à un système de coordonnées national (représentation absolue) ou par rapport à une surface de référence (représentation relative) (Stoter, 2004). Dans une représentation absolue, l'intégration d'objets 2D requiert l'attribution d'une hauteur absolue à ces objets en tenant compte de leur variation spatiale pour permettre la gestion des relations géométriques et topologiques 3D. Dans une représentation relative, les objets 2D ne nécessitent pas une représentation dans un espace 3D et sont attribués une hauteur relative définie par rapport à une surface de référence qui est le MNT. Dans ce cas, la complexité est atténuée mais il faut noter que la définition de la surface de référence peut être sujette à des ambiguïtés (Stoter, 2004).

La représentation des objets par un modèle 2.5D ne permet pas d'atteindre un niveau de granularité de l'information suffisant pour entreprendre certaines analyses spatiales. La figure 1.2 illustre un cas de représentation 2.5D correspondant à une entité bâtiment 3D où les structures internes sont ignorées et les faces ne sont pas représentables. Une représentation 2.5D peut être dérivée d'une représentation 3D par frontières (basée sur le modèle *Boundary-Representation*) où uniquement les facettes supérieures visibles sont capturées (Fig 1.3) (De Cambray, 1993).

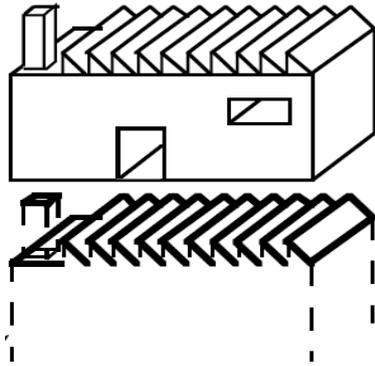


Fig1. 2 Représentation 2.5D correspondant à une entité 3D

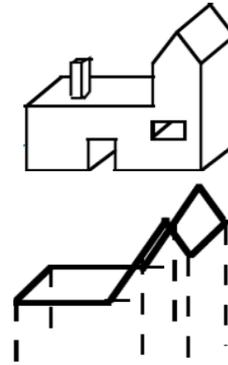


Fig1. 3 Extraction d'une représentation 2.5D à partir d'une représentation 3D

Les modèles 2.5D s'avèrent donc insuffisants dans bon nombre d'applications nécessitant une représentation de l'espace urbain à petite échelle comme la gestion des mouvements de personnes durant les opérations de secours (Lee et Zlatanova, 2008). Ainsi, seule une véritable représentation 3D définie par rapport à un référentiel 3D est capable de représenter correctement la réalité et lever des ambiguïtés lorsqu'il s'agit de structures internes non représentables via un modèle 2.5D.

1.2.2 Les Géo technologies 3D: DAO, SIG et SGBD

Aujourd'hui, le monde de la géomatique est balisé par des outils performants pour la gestion des données 3D. Les SIG et les systèmes DAO (*Dessin Assisté par Ordinateur*): deux familles de logiciels appartenant à des organisations différentes, conçus pour des objectifs différents et par la suite différents par leurs modèles, formats et outils performant chacun dans un volet de la 3D. Du côté SGBD, les données 3D requièrent des structures adaptées et des modes de stockage flexibles qui permettent d'interroger les données 3D de manière très élaborée.

1.2.2.1 La 3D dans les systèmes DAO et SIG

Les logiciels DAO sont des outils qui ont été conçus à la base pour des besoins spécifiques en architecture, en ingénierie mécanique et en construction, solutions dites AEC (*Architecture/Engineering/Construction*). Les SIG étaient plutôt conçus pour représenter et analyser la réalité dans un système de coordonnées géographiques. La différence la plus fondamentale est que les SIG modélisent le monde tel qu'il existe alors que les modèles DAO en élaborent une vue à projeter dans la réalité (Ibraheem et al, 2012).

Si on focalise sur la question de la 3D, il est communément admis que les outils DAO (comme *3dsMax*, *Maya*, *Blender*, etc) sont plus performants dans la conception et la

modélisation 3D. Ils permettent de représenter des objets complexes en 3D avec une grande précision (incluant des surfaces libres, etc). Ceci est en dehors des capacités d'un SIG. Au niveau de l'analyse spatiale, les SIG sont plus en avance sur cette question grâce à leur potentiel d'analyse et de traitement pouvant être assuré dans un espace 3D malgré qu'ils n'aient pas encore atteint un degré de maturité, vu que les fonctions disponibles sont essentiellement basées 2D (Desgagné, 2010). Parmi les outils les plus avancés, le SIG ArcGIS et les SIG développés sur la base des outils Autocad et Microstation. Le SIG Open Source Grass dispose également de fonctions d'analyse exploitant la troisième dimension (Neteler et al, 2012).

Avec l'évolution des besoins en gestion des données géospatiales, les préoccupations sont orientées vers l'intégration des fonctionnalités des deux systèmes (Karimi et Akinci, 2010). Les solutions disponibles sont orientées vers le transfert de modèles 3D entre les deux mondes SIG et DAO sans que les problèmes fondamentaux d'intégration soient abordés. Oosterom et al (2006); Karimi et Akinci (2010) considèrent que l'intégration est conditionnée par un «mapping» d'ontologies entre les deux domaines pour définir une ontologie intégrée offrant un cadre unique pour l'échange entre les deux systèmes tout en assurant la consistance lors des mises à jour. Le problème de traduction entre les formats SIG et DAO est techniquement résolu avec des outils comme FME (*Feature Management Engine*). Du point de vue conception de solutions, la question est orientée vers le couplage des fonctionnalités des deux systèmes pour profiter de leurs avantages. Dans ce contexte, Desgagné (2010) a proposé un SIG 3D basé sur l'extension d'un outil de modélisation 3D de type DAO et son couplage à un SGBD pour le stockage des modèles.

1.2.2.2. La 3D dans les SGBD spatiaux

Les SGBD ont évolué vers une architecture intégrée permettant la gestion des données spatiales et non spatiales (Breunig et Zlatanova, 2005). Les SGBD spatiaux implémentent le standard «Simple Feature Specifications for SQL» (*SFS for SQL*) de l'OGC (*Open GIS Consortium*) qui est à la base un schéma spatial vectoriel destiné à la modélisation 2D.

Oracle, le leader mondial des SGBD, a lancé son module Oracle Spatial pour l'interrogation et la gestion des données spatialement référencées. Les objets géométriques et les opérateurs spatiaux d'Oracle Spatial sont implémentés suivant les spécifications *SFS for SQL* avec l'intégration des spécifications de GML 3.1.1 et ISO 19107. Depuis la version 11g, Oracle a mis sur le marché un premier SGBD spatial intégrant une primitive volumique permettant de stocker des modèles 3D à partir d'un assemblage de surfaces (à la manière du B-Rep). Oracle Spatial implémente un index spatial 3D de type R-Tree et offre au niveau 3D des opérateurs spatiaux métriques comme par exemple le calcul de distance, de superficie et de volume (Oracle, 2011).

Du côté des SGBD libres, PostgreSQL avec sa cartouche spatiale PostGIS offre les mêmes possibilités côté stockage, analyse et indexation que ses concurrents Oracle Spatial, SQL Server, etc. Cependant, il ne supporte pas de primitive volumique. La structure «*MultiPolygon*» est utilisée en alternative. Il est aussi certifié OGC pour son implémentation du *SFS for SQL*. Malgré la possibilité de stockage des coordonnées 3D, PostgreSQL ne permet pas encore de traiter des objets 3D comme les solides et se limite à quelques fonctionnalités 3D, notamment "*ST_Length3D*", "*ST_Box3D*", etc. Dans ce contexte, Khuan

et al (2007) ont proposé la structure «*Polyhedron*» (polyèdre) comme un nouveau type de données 3D ainsi que les règles de son implémentation dans PostGIS.

Le manque d'une vraie primitive 3D dans les SGBD engendre deux problèmes majeurs : la non reconnaissance des objets spatiaux 3D par le SGBD et la redondance engendrée par la cardinalité [1-n] qui maintient la relation entre l'objet 3D et ses composants géométriques 2D (Arens et al, 2005). Les SGBD se limitent au stockage des coordonnées 3D (x, y, z) et ne fournissent pas un support suffisant de la 3D lors des calculs (Schön et al, 2012; Desgagné, 2010). Les développements se limitent à quelques fonctionnalités 3D disponibles dans Oracle Spatial (11g) (Brugman, 2010), reconnu jusqu'à maintenant comme le SGBD le plus avancé en termes d'implémentation de types spatiaux 3D et d'un index spatial 3D (Schön et al, 2012). La recherche dans l'indexation spatiale 3D a été centrée sur l'extension des méthodes Quadtree et R-Tree, comme l'Octree et le 3D R-Tree (Zhu et al, 2007). Schön et al (2012) proposent un index de type Octree pour Oracle Spatial 11g en vue d'atteindre une meilleure performance dans la gestion des données Lidar 3D.

1.3 Standardisation et interopérabilité des données 3D

Aujourd'hui, les modèles 3D sont utilisés dans de nombreux domaines et couvrent des usages multiples. Cependant, l'échange des données entre ces modèles est un problème récurrent qui freine leur diffusion et augmente le coût de leur production. L'interopérabilité vise à intégrer ces modèles dans un cadre cohérent qui assure une fluidité dans le transfert des données (El-Mekawy, 2010) et leur réutilisation en dehors du contexte dans lequel elles ont été créées. L'interopérabilité des données est un besoin crucial et un des enjeux majeurs dans le développement des infrastructures de données spatiales. Elle porte sur deux composantes: une interopérabilité syntaxique (souvent associée aux protocoles et aux formats de données) et une interopérabilité sémantique (qui assure que la donnée ou l'information sauvegarde sa signification précise en dehors de l'application dans laquelle elle a été définie) (Kubicek et al, 2011).

L'interopérabilité dans la modélisation 3D urbaine est l'objectif fondamental derrière le développement du standard CityGML (El-Mekawy, 2010). Nous présentons dans cette partie les caractéristiques de base du CityGML et nous le comparons à d'autres formats ou standards existants pour la 3D.

1.3.1 CityGML

CityGML est un format de modélisation et d'échange pour les objets urbains 3D qui a été validé comme standard international par l'OGC en 2008. Il définit un modèle de représentation des classes et des relations pour les objets les plus courants de la ville sous les différents aspects géométriques, topologiques, sémantiques et texturaux. CityGML est basé sur GML3 (*Geography Markup Language*) qui est une spécification de l'OGC. Le standard CityGML possède plusieurs caractéristiques dont la modularité, la représentation des niveaux de détail, la richesse sémantique, etc. (Kolbe, 2009).

- Modularité

CityGML est un ensemble de modules spatiaux pour la représentation en 3D des objets urbains. Son modèle dispose d'un module principal (*Core module*) et de modules d'extension (*Extension modules*). Le module de base comprend les composants et les spécifications de

base du modèle CityGML et doit par conséquent être implémenté dans tout système pour respecter la norme. Par contre, les modules d'extension demeurent optionnels; ils couvrent chacun un champ thématique particulier, par exemple: les bâtiments, le transport, l'utilisation du sol, etc. (Gröger et al, 2008). La figure 1.4 illustre les principaux modules thématiques du CityGML (version 1.0). D'autres objets ont été ajoutés dans la version 2.0 du CityGML comme les ponts et les tunnels (Gröger et Plümer, 2012).

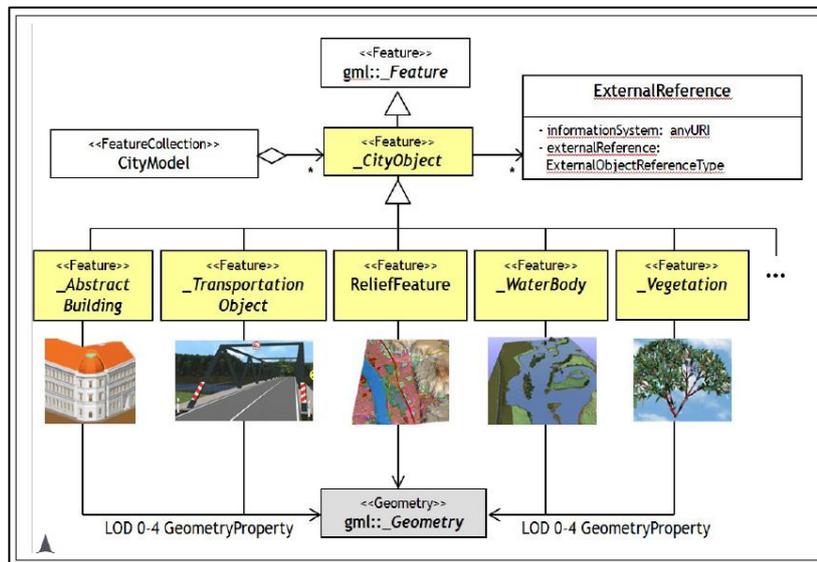


Fig1. 4. Les principaux modules thématiques du CityGML (Kolbe, 2009)

- Modélisation Multi-Echelle

CityGML se base sur cinq niveaux de détails (Levels of Detail : Lod) (Fig1.5) permettant l'analyse et la visualisation du même objet à différents niveaux de résolution. Les applications utilisent le niveau de détail le plus adapté à leurs besoins (Gröger et al, 2008). Les niveaux de détail sont utiles pour gérer différents types de collections de données et faciliter leur visualisation (Kolbe, 2009). Le premier niveau Lod0 correspond essentiellement au MNT, sur lequel des images peuvent être drapées. La représentation en Lod0 pour les bâtiments a été introduite dans la version 2.0 du CityGML (adoptée par l'OGC en Mars 2012) pour permettre l'intégration des données 2D/2.5D (Fig1.6). Le niveau Lod1 correspond au modèle en blocs de bâtiments avec des toits plats. Le niveau Lod2 permet la représentation différenciée des structures de toits. Le niveau Lod3 permet la représentation de modèles architecturaux avec la structure détaillée des murs et des toits, des balcons, etc. Le niveau Lod4 ajoute des structures intérieures aux objets 3D. Par exemple, les bâtiments sont composés de chambres, de portes intérieures, d'escaliers, etc.

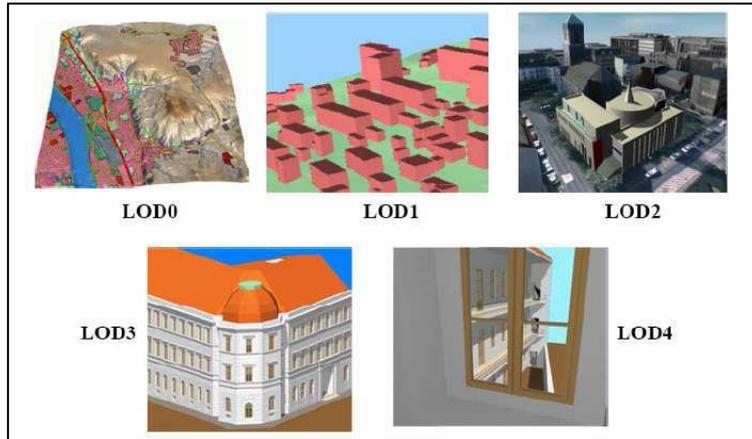


Fig1. 5. Les cinq niveaux de détails définis par CityGML (Gröger et al, 2008)

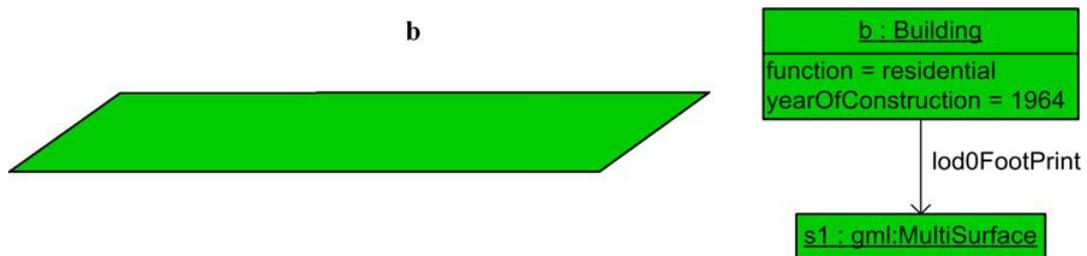


Fig1. 6. Représentation spatiale d'un bâtiment en Lod0 et le diagramme UML d'instance associée (Gröger et Plümer, 2012)

- Géométrie, sémantique et topologie

CityGML est composé de deux hiérarchies distinctes, l'une sémantique et l'autre géométrique dans lesquelles les objets sont reliés entre eux par des relations (*Fig1.7*). Cette approche se singularise par une navigation possible dans et entre les deux hiérarchies et permet ainsi de répondre à des requêtes thématiques et/ou géométriques. CityGML propose un modèle spatial avec une représentation explicite de la topologie. Les relations topologiques sont modélisées par le principe de référencement. Un objet géométrique peut rentrer dans la définition de plusieurs objets (ex : surface commune entre deux bâtiments mitoyens), il est stocké une seule fois mais référencé autant de fois qu'il intervient dans la définition d'autres objets ou géométries complexes. La représentation topologique dans CityGML va au-delà de la méthode B-Rep qui se limite généralement aux parties visibles d'un bâtiment pour inclure par exemple une surface invisible entre deux solides adjacents (*Fig1.8*).

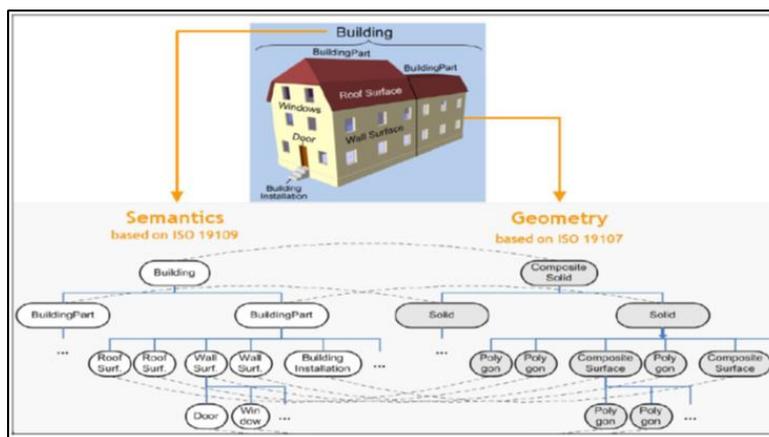


Fig1. 7. Relations entre les modèles sémantiques et géométriques du CityGML

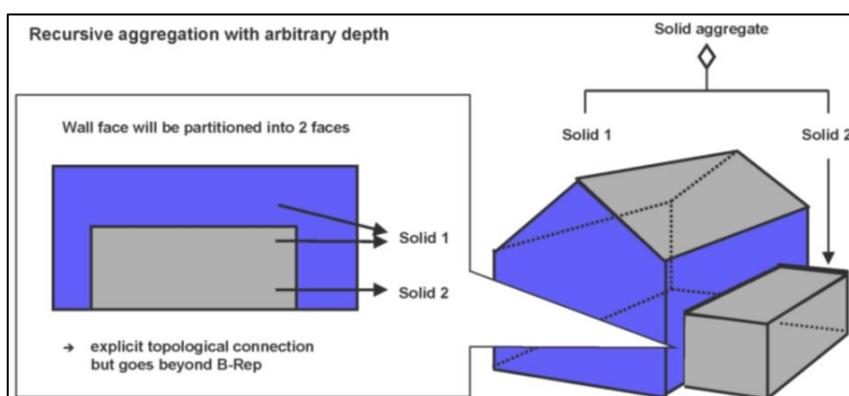


Fig1. 8. Connexion topologique explicite entre deux solides (Gröger et al, 2008)

Plusieurs modèles de villes sont maintenant représentés selon le standard CityGML. Notamment, en Allemagne, la plupart des grandes villes est modélisée en Lod2 ou Lod3. Le projet Bâti 3D de l'IGN-France définit un profil CityGML en Lod2 pour Paris et autres villes (Nantes, Marseille, etc.). Le projet 3DPilot adopte CityGML pour définir un modèle 3D de référence dans le cadre d'une infrastructure 3D aux Pays-Bas (Stoter et al, 2011). Cependant, CityGML est complexe et son adoption s'affronte à plusieurs problèmes que nous allons analyser plus loin dans ce document.

1.3.2 Relations avec d'autres standards

Il existe d'autres standards comme VDI3805 et IFC (*Industry Foundation Class*) pour la modélisation 3D de l'information sur les bâtiments à différentes échelles. VDI3805 est une norme de l'industrie qui est utilisée pour modéliser tous les équipements des services rattachés au bâtiment (chauffage, climatisation, protection sanitaire, etc.) (Fig1.9). Le standard IFC développé et maintenu par BSI (*Building Smart International*) et IAI (*International Alliance for Interoperability*) est un format orienté objet utilisé comme modèle de référence pour la représentation de l'information géométrique et sémantique concernant les composants d'un bâtiment (Fig1.10). Il supporte certains traitements et analyses basés sur leurs relations spatiales (El-Mekawy et al, 2012). Différents systèmes CAD/AEC (Bentley, Autocad, Archicad) sont capables d'importer et d'exporter leurs modèles selon le standard IFC (Isikdag et Zlatanova, 2009). Les correspondances entre CityGML et IFC sont illustrées par la figure 1.11



Fig1. 9. Relation entre CityGML, IFC et VDI3805 (KIT, 2011)

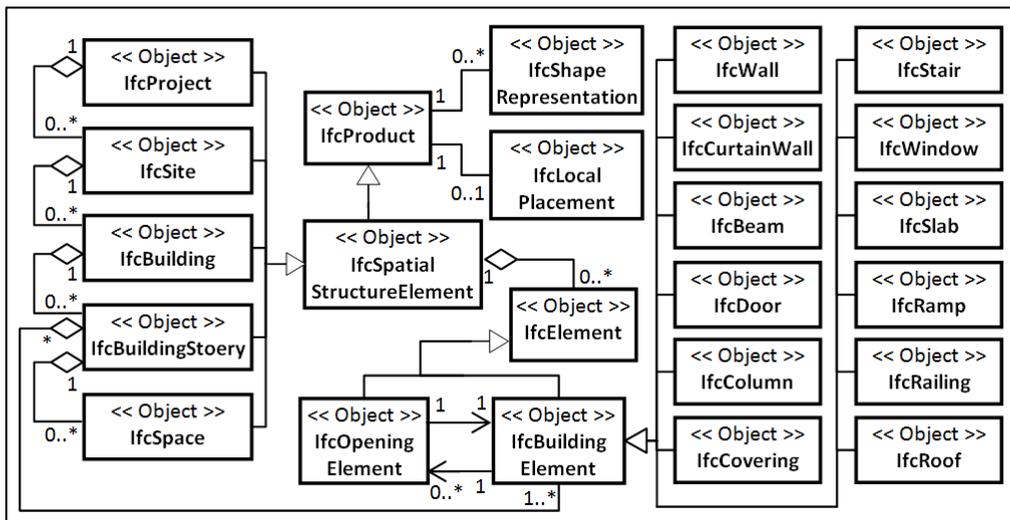


Fig1. 10. Le modèle IFC

Plusieurs outils ont été développés pour la transformation entre les trois standards. Notamment, "ETU VDI 3805 Navigator" (pour convertir le modèle VDI 3805 en un format IFC) et "IFCExplorer" (pour la conversion du format IFC vers les différents Lods du CityGML) (IAI, 2008). La question d'intégration entre les standards IFC et CityGML occupe une place prépondérante dans le domaine de la recherche en 3D. Elle est requise pour une modélisation riche de l'espace urbain à plusieurs niveaux de détail (El-Mekawy et al, 2011). Les investigations dans ce cadre sont multiples, dont celles de Isikdag et Zlatanova (2009); Hijazi et al (2009); El-Mekawy et al (2011); El-Mekawy et Östman (2010); Benner et al (2010).

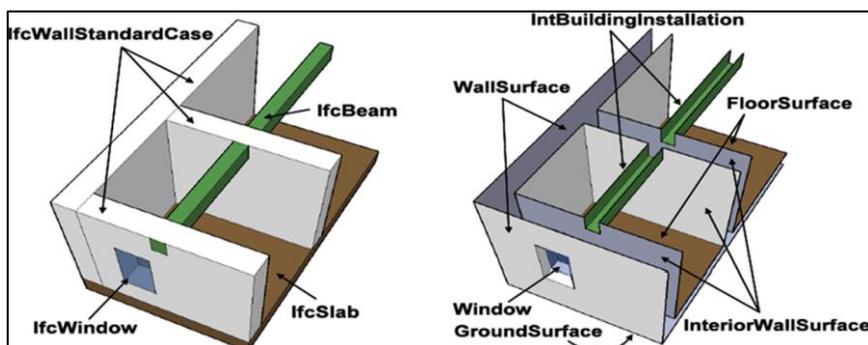


Fig1. 11. Différentes représentations sémantiques d'un bâtiment selon IFC (Figure gauche) et CityGML (Figure droite) (Nagel et al, 2009)

1.3.3 Comparaison avec d'autres formats 3D

En plus du CityGML, il existe d'autres formats pour la représentation des données 3D, relevant du domaine de l'infographie 3D comme X3D (ISO, 2008), VRML (ISO, 2004) et 3D PDF, ou développés pour des fins de visualisation 3D comme KML (Wilson, 2008) et COLLADA (Barnes et al, 2008). Les différents mécanismes d'exploitation des données 3D basés sur ces formats/standards ont été étudiés dans le cadre du projet "3D Portrayal Interoperability Experiment" de l'OGC (accompli en 2011) dont l'objectif était de démontrer l'interopérabilité des formats à travers des illustrations sur des projets concrets. Dans le cadre du projet 3DPilot, Stoter et al (2011) ont comparé différents formats 3D sur base d'un ensemble de critères comme le support de la géométrie /topologie 3D, la sémantique, les niveaux de détail, etc. (Tab1.1).

Critère	DXF	SHP	VRML	X3D	KML	Collada	IFC	CityGML	3D PDF
Géométrie	++	+	++	++	+	++	++	+	++
Topologie	-	-	0	0	-	+	+	+	-
Texture	-	-	++	++	0	++	-	+	+
Lod	-	-	+	+	-	-	-	+	-
Objets	0	+	+	+	-	-	+	+	+
Sémantique	+	+	0	0	0	0	++	++	+
Attributs	-	+	0	0	0	-	+	+	+
Support XML	-	-	-	+	-	-	+	+	-
Web	-	-	+	++	++	+	-	+	0
Géo-Réf	+	+	-	+	+	-	-	+	+
Diffusion	++	++	++	0	++	+	0	+	++

Tab1. 1. Comparaison entre les formats 3D (adopté de Stoter et al, 2011)

"-": Pas de support ; "0" : Support basique ; "+" : Supporté ; "++" : Support étendu

Il s'avère, à travers les résultats de la comparaison, que les performances des formats 3D varient en fonction des critères à privilégier. En particulier, le choix du CityGML se justifie par sa richesse sémantique. Il n'existe pas de modèle standardisé pour la représentation des objets urbains qui propose une sémantique aussi riche que celle du CityGML (Gröger et Plümer, 2012). Les formats KML et X3D, par exemple, restent optimisés pour la visualisation, même avec la proposition de profils pour l'information sémantique et attributaire. En outre, la représentation de l'information selon les niveaux de détail représente un potentiel majeur du CityGML.

1.4 Généralités sur les SIG 3D

1.4.1 Définition d'un SIG 3D

Dans la littérature, plusieurs définitions ont été attribuées aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), appelés aussi Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) pour lever l'ambiguïté par rapport au SIG logiciel. Mais toutes les définitions partagent les données géo référencées comme données centrales pour une application SIG. Ainsi, un SIG peut être défini comme «*un environnement conçu pour l'analyse et la modélisation de la distribution spatiale de phénomènes. Il se compose d'une base de données géographique,*

d'une boîte à outils contenant des procédures d'analyse, de gestion, de saisie et de représentation, ainsi qu'une interface utilisateur» (Collet, 1992) (cité par Koussa (2011)). Les SIG prennent complètement en charge deux aspects importants: l'information du problème et sa représentation spatiale. Un SIG place le problème dans un cadre spatial cohérent du point de vue de l'information et de la représentation (Joliveau, 2004). Le cycle de vie d'un SIG assure plusieurs fonctions dites les "5A": Abstraction, Acquisition, Archivage, Analyse et Affichage des données à caractère spatial.

Le SIG 3D s'aligne sur la définition générale d'un SIG et se décline pour répondre à des problèmes de gestion des données spatiales en prenant en compte une nouvelle dimension spatiale des objets et/ou de l'univers dans lequel ils se trouvent. Ainsi, le SIG 3D est vu comme une nouvelle génération de SIG qui prend en charge les différents aspects de modélisation, d'analyse, de traitement et de représentation de l'information géographique tridimensionnelle à travers des structures géométriques 3D (Desgagné, 2010). Worboys (1995) cité par (Rahman et Pilouk, 2008) définit le SIG 3D sur base des fonctionnalités qu'il doit assurer : *«A 3D GIS should be able to model, represent, manage, manipulate, analyse and support decisions based upon information associated with three-dimensional phenomena»*.

1.4.2 Le SIG 3D: Une solution aux limites des SIG 2D/2.5D

Aujourd'hui, les données 3D constituent un besoin crucial pour une panoplie d'applications spatiales. Leur analyse dans un environnement 3D garantie une meilleure perception et compréhension de la réalité (cas des structures internes des bâtiments, par exemple). Les limites des SIG 2D quand à la dimensionnalité et aux structures de données ont été reportées dans la littérature par Jones (1989), Raper et Kelk (1991), Rongxing Li (1994), Houlding (1994) et Bonham-Carter (1996) (cités par Rahman et Pilouk, 2008). Les SIG actuels ont étendu leurs fonctionnalités spatiales mais ils restent limités à la gestion des modèles 2D et à quelques fonctions "3D" basiques comme l'extrusion.

Dans les SIG 2D ou 2.5D, les composantes d'un objet qui consistent en sa géométrie plane et son aspect tridimensionnel ont été modélisées séparément, ce qui a donné lieu à deux systèmes différents: le MNT pour la représentation du relief et les SIG 2D pour la gestion de la planimétrie. Cette solution est source de redondance et d'un manque de consistance (Rahman et Pilouk, 2008). En effet, les relations spatiales entre l'information stockée dans le MNT et celle d'un SIG ne peuvent pas être correctement représentées parce qu'elles ne tiennent pas compte de la topologie. L'information dérivée d'un MNT (pente, hauteur, etc.) doit être toujours convertie en une couche SIG et superposée avec d'autres couches thématiques afin d'exécuter des analyses spatiales. C'est la notion du SIG *«Mille-feuille»*. L'intégration de l'information spatiale avec ses deux composantes planimétrique et altimétrique dans un modèle 3D unique, sans avoir recours à des transformations ou conversions de formats, permet d'assurer la consistance des données et d'entreprendre différents types d'analyses liés à l'information spatiale 3D dans un seul système.

Trivialement, le développement d'un SIG 3D est motivé par la demande accrue en information 3D, et aussi par la révolution technologique enregistrée dans le domaine de la 3D allant de l'acquisition des données 3D, de la reconstruction des objets 3D vers les techniques de visualisation et de réalité virtuelle (Stoter, 2004). Des structures 3D définies par leur géométrie et leur sémantique et manipulées dans le cadre d'un SIG 3D

permettraient une gestion optimale et intelligente de l'information 3D. Un des exemples de la potentialité des SIG 3D est leur capacité à offrir une plateforme pour la simulation des catastrophes via la modélisation et la manipulation des propriétés dynamiques des objets spatiaux qui ne sont pas prises en charge par les SIG 2D (Hashemi Beni et al, 2007). Pilouk (1996) justifie l'utilité d'un SIG 3D par l'insuffisance des systèmes DAO qui sont des outils qui focalisent sur l'aspect géométrique du modèle 3D et sa visualisation, alors que le SIG 3D est l'outil potentiel pour les applications spatiales basées sur la modélisation 3D.

1.4.3 Le SIG 3D : Modélisation et fonctionnalités

La modélisation est un processus complexe qui s'impose dans la mise en place de toute architecture système qui vise à représenter un phénomène de la réalité et l'analyser pour pouvoir prendre des décisions. Un modèle est établi pour faire une abstraction de la réalité en vue de la rendre compréhensible (Stoter, 2004). La modélisation spatiale porte sur les aspects géométriques, topologiques et attributaires relatifs aux données spatiales. Grâce à la technologie informatique, les connaissances sur la réalité tridimensionnelle peuvent être transférées dans un modèle 3D numérique et ce, par un processus connu sous le nom de modélisation 3D (Rahman et Pilouk, 2008). Dans cette partie, nous focalisons sur la modélisation conceptuelle des données 3D au niveau géométrique et topologique ainsi que les relations spatiales entre les objets. Nous présentons ensuite les bases de l'analyse spatiale 3D.

1.4.3.1 Modélisation géométrique 3D

Une forme géométrique 3D est représentée par association d'un ensemble de primitives géométriques. Le terme "*primitive géométrique*" signifie dans le domaine de l'infographie et de la CAO tout objet géométrique atomique (Koussa, 2011). Selon les spécifications de l'OGC, «*a geometric primitive is a geometric object that is not decomposed further into other primitives in the system*» (OGC, 2004). Les structures géométriques sont généralement associées avec des données sur l'apparence physique (texture, couleur,..), des informations temporelles ainsi que des données attributaires.

Il existe différentes approches et méthodes pour modéliser une géométrie 3D qui peuvent être classées en cinq familles: modélisation filaire, modélisation surfacique, modélisation volumique, modélisation hybride et modélisation paramétrique. Plusieurs états de l'art sur les modèles géométriques 3D sont répertoriés dans la littérature. Nous renvoyons le lecteur vers les références suivantes: (Koussa, 2011); (Laferté et al, 2009); (Rahman et Pilouk, 2008); (Ekberg, 2007); (Lafarge, 2007); (Lachance, 2005); (Ramos, 2003); (Billen, 2002); (De la Losa, 2000), etc.

La question sur le choix d'une modélisation géométrique 3D est fondamentale. L'utilisateur doit d'abord faire sa propre perception de l'objet 3D à représenter puis analyser sur base d'un ensemble de critères les modèles existants pour adopter une méthode de modélisation appropriée. Plusieurs critères ont été présentés dans Koussa (2011) et Ramos (2003). Parmi lesquels nous retenons les plus pertinents dans le cadre d'une modélisation géométrique 3D:

- Etendue du domaine: elle doit être suffisamment grande pour permettre de représenter un grand nombre d'objets.

- Potentiel topologique: la représentation doit permettre une bonne maîtrise des relations topologiques entre les objets.
- Granularité de la représentation : la représentation doit permettre de décrire les objets avec plusieurs niveaux de détail avec une flexibilité de passage entre ceux-ci.
- Caractéristiques des objets: les objets du monde géographique peuvent être naturels ou artificiels, avec limites définies ou indéfinies, spatialement continus ou atomiques, etc. Il faut alors choisir la représentation qui s'adapte à la nature de l'objet.
- Interopérabilité: Les représentations doivent être étudiées au regard des standards existants pour la 3D. L'idéal est de faire une représentation qui s'adapte aux besoins mais qui peut facilement se greffer sur le modèle spatial d'un standard 3D comme le CityGML par exemple.
- Performance: dans le stockage et l'interrogation du modèle géométrique.

Si on considère le critère de l'unicité, le modèle CSG (*Constructive Solid Geometry*), basé sur la combinaison de primitives géométriques simples via des transformations géométriques ou des opérations booléennes n'est pas adapté vu qu'il peut donner lieu à des représentations non uniques d'un objet (*Fig1.12*) (De la Losa, 2000). L'approche Octree (*Fig1.13*), bien que largement utilisée dans la visualisation des géométries solides dans l'espace, son usage dans les SIG est limité vu la difficulté de structuration des données spatiales selon ce modèle. Le modèle TIN 3D (*Fig1.14*) reste bien approprié pour la représentation des objets spatiaux 3D (Rahman et Pilouk, 2008). Dans le cas des bâtiments, les représentations surfaciques comme B-Rep (*Boundary-Representation*) (*Fig1.15*) et NURBS (*Non Uniform Rational Basic Spline*) (*Fig1.16*) sont les plus connues. Bien que cette dernière fournisse une description mathématique précise permettant un réalisme dans la représentation d'objets complexes, elle nécessite une implémentation dans les SGBD spatiaux (Koussa, 2011). La méthode B-Rep, par son caractère intuitif, permet de couvrir un très grand domaine vu que la plupart des solides peuvent être représentés par des surfaces. Elle est bien adaptée pour l'utilisation en multi-échelle et possède un bon potentiel topologique. En termes d'interopérabilité, elle est compatible avec les primitives géométriques (Point, Linestring, Polygon, MultiLineString, MultiPolygon, etc.) définies par les spécifications de l'OGC. En plus, la méthode B-Rep peut permettre des fonctions 3D comme le calcul de volume dans le cas où les faces sont orientées (Ramos, 2003). Cependant, la méthode est très peu compacte puisque la description de certains objets demande un grand nombre de surfaces pour les représenter (Ramos, 2003).

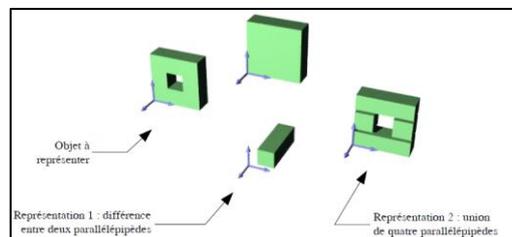


Fig1. 12 Non unicité de la représentation en CSG (De La Losa, 2000)

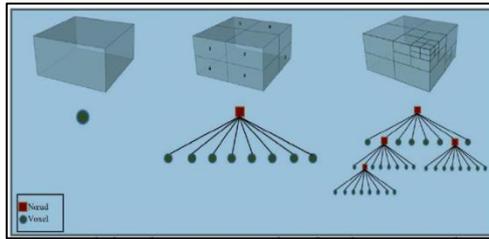


Fig1. 13 Arbres Octree associés à des structures cubiques subdivisées en voxels (Koussa, 2011)

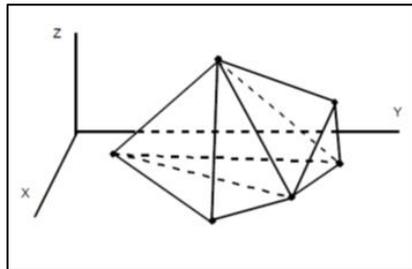


Fig1. 14 Exemple d'un modèle TIN 3D (Rahman et al, 2008)

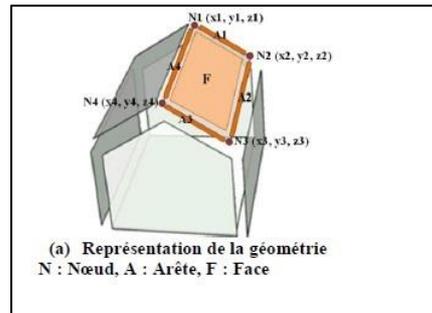


Fig1. 15 Représentation surfacique par la méthode B-Rep

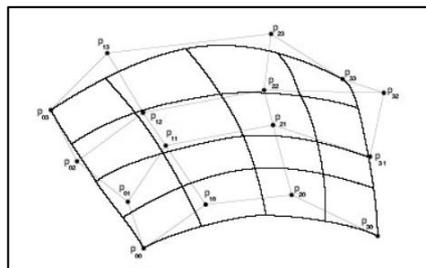


Fig1. 16 Représentation d'une surface par la méthode NURBS

1.4.3.2 Les relations spatiales

Les relations spatiales peuvent être classées en trois catégories: topologiques, projectives, et métriques, qui sont respectivement basées sur les propriétés de l'espace topologique, projectif, et euclidien (Clementini, 2009). Les relations métriques (comme la distance) sont normalement basées sur des relations quantitatives. Les relations projectives sont de nature qualitative et n'ont pas besoin de mesures précises pour être expliquées, elles peuvent être décrites par des propriétés projectives de l'espace sans avoir recours aux propriétés métriques (Billen et Clementini, 2004). Les relations projectives sont plus précises que les relations topologiques et peuvent servir de base pour décrire les relations qui ne sont pas décrites par la topologie comme: «à droite de», «en avant de», «entre», «le long de», «entouré par», «devant», «arrière», «au nord de», «à l'est de», etc. (Clementini et Laurini, 2008).

Les relations topologiques sont liées aux types des objets (ex: relations définies uniquement entre une surface et un corps), ce qui fait que certaines relations ne sont pas inspectées si la dimension des objets est connue à l'avance. Aussi, la répartition géométrique de l'espace pour une certaine application permet de sélectionner les relations à

sauvegarder par le modèle (ex la relation entre un corps et une surface n'est pas requise dans les applications urbaines) (Zlatanova, 2000(a)). D'un autre côté, la dimension de l'espace est très importante pour le classement des relations topologiques. Cependant, la recherche était beaucoup plus centrée sur l'étude des relations entre les objets géographiques (points, lignes et régions) dans l'espace 2D alors que les investigations dans l'espace 3D sont moins importantes.

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour formaliser les relations topologiques entre deux objets : le modèle des quatre intersections (4I) (Egenhofer, 1989), le modèle des neuf intersections (9I) (Egenhofer et Herring, 1990) et le «Dimension Extend Method» (Clementini et al, 1993). Alors que le modèle des 4I considère uniquement l'intérieur et la frontière des objets, le modèle des 9I (Fig1.17) est basé sur l'étude des trois composants de chaque objet: l'intérieur, la frontière et l'extérieur. Le «Dimension Extend Method» (DEM) peut être considéré comme une extension du modèle des 4I (Clementini et al, 1993) en ajoutant l'information sur le type d'intersection entre l'intérieur et la frontière des objets.

$$\begin{pmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B & A^{\circ} \cap B^{-} \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^{-} \\ A^{-} \cap B^{\circ} & A^{-} \cap \partial B & A^{-} \cap B^{-} \end{pmatrix}$$

Fig1. 17 Matrice des 9 intersections (Egenhofer et Herring, 1990)

A° , A^{-} , ∂A : Intérieur, extérieur et frontière de l'objet A
 B° , B^{-} , ∂B : Intérieur, extérieur et frontière de l'objet B

Bon nombre de modèles topologiques 2D ou 2.5D ont été implémentés par les SIG et les SGBD. Néanmoins, l'ajout de la 3D augmente le degré de complexité des relations spatiales entre les objets et requiert la définition de nouvelles approches pour les modéliser. Pour identifier les relations topologiques entre deux objets dans un espace 3D, le modèle des 9I adopté par l'OGC comme un cadre conceptuel pour l'implémentation, a été étendu à la 3D par Zlatanova (2000a).

Dans le cadre de l'étude des relations topologiques dans un espace 3D, il n'y a pas de compromis entre le nombre de combinaisons possibles ni sur le nombre de conditions négatives définies par les auteurs, ce qui complique leur comparaison (Zlatanova, 2000(a)). Dans Zlatanova (2000a), le modèle des neuf intersections d'Egenhofer a été étendu à la 3D par détermination des relations spatiales possibles entre objets spatiaux 3D et la définition des singularités (conditions négatives) permettant de conserver uniquement les relations possibles (Zlatanova, 2000a). En appliquant ces contraintes, 69 types de relations spatiales seraient possibles en 3D et devraient donc être considérées lors de l'implémentation d'une application offrant des capacités d'analyse spatiale 3D (Desgagné, 2010).

1.4.3.3 Modélisation topologique 3D

La topologie est la branche des mathématiques s'intéressant aux propriétés des objets invariants par homomorphisme (Ramos, 2003). Les primitives géométriques constituent la

base de la modélisation alors que la topologie ajoute la définition et la maintenance des relations de connectivité et d'inclusion entre les objets pour améliorer la consistance des données et garantir leur cohérence. Le standard ISO 19107 définit les objets topologiques (*TP_Object*) (Fig1.18) associés aux objets géométriques (*GM_Object*) et propose une taxonomie pour standardiser la définition des opérateurs topologiques: «*equals*», «*disjoint*», «*intersects*», «*touches*», «*crosses*», «*within*», «*contains*», «*overlaps*».

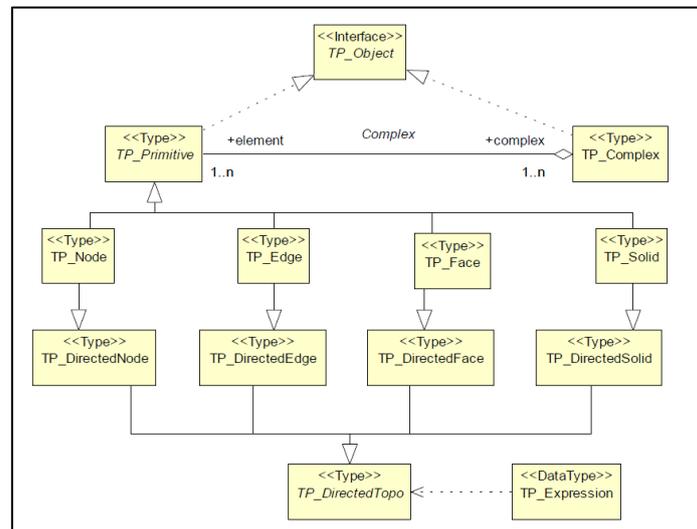


Fig1. 18 Schéma conceptuel topologique de l'ISO 19107

La définition d'un modèle topologique 3D est étroitement liée aux spécifications requises pour une certaine application. Plusieurs questions sont à considérer: le type de subdivision de l'espace en fonction des relations de voisinage entre les objets, les composants des objets (faces ou volumes) et les règles de leur construction (planéité, contraintes d'intersection, etc.) (Zlatanova et al, 2004). Plusieurs modèles topologiques ont été présentés dans la littérature. Nous citons: 3D Formal Data structure (*3D FDS*) de (Molenaar, 1990); *TEtrahedral Network (TEN)* de (Pilouk, 1996); le modèle *Object Oriented* de (De La Losa et Cervelle, 1999); *Simplified Spatial Model (SSM)* de (Zlatanova, 2000b); *SOMAS* (Plund, 2001); *Urban Data Model (UDM)* de (Coors, 2003); *LT-UDM* de (Nguyen gia, 2011) et le modèle *CityGML* de (Gröger et al, 2007).

Les modèles topologiques 3D diffèrent au niveau de la maintenance des primitives, le nombre de primitives impliquées, le type de partition de l'espace et dans la définition des singularités, etc. (Brugman, 2010). Certes, plusieurs méthodes existent pour modéliser une structure topologique mais aucune d'entre elles n'est définie de manière universelle pour supporter toutes les applications possibles (Stoter et Oosterom, 2006; Brugman, 2010). Les performances des modèles diffèrent en fonction du cadre d'application. A titre d'exemple, les modèles *TEN (TEtrahedral Network)* et *UDM (Urban Data Model)* sont mieux adaptés pour une visualisation 3D (Zlatanova et al, 2004). Aussi, le modèle *SSM* élimine plusieurs relations topologiques représentées dans le modèle *3D FDS*, il s'avère donc plus performant (Shi et al, 2003). Ramos (2003) recommande le recours à une représentation topologique simple. Il considère que "l'exhaustivité topologique" engendre des difficultés de maintenance et des lourdeurs de calcul. Stoter et Oosterom (2006) proposent la maintenance de plusieurs modèles topologiques dans une seule base de données à travers la description des objets, des règles et des contraintes pour chaque modèle dans une table de métadonnées.

1.4.3.4 Fonctionnalités et analyse spatiale 3D

Par définition, un SIG 3D doit offrir les mêmes fonctionnalités qu'un SIG 2D tout en les adaptant à la donnée volumique. Le problème ne se réduit pas à une simple extension des SIG 2D par l'ajout d'une nouvelle dimension spatiale. C'est tout le processus de modélisation et de structuration des données qui doit être revu dans un contexte 3D (Rahman et Pilouk, 2008; Rahman et al, 2001). Le passage à la 3D engendre une grande complexité notamment pour le développement d'algorithmes pour les fonctions 3D (Arens et al, 2005). Le développement d'un SIG 3D demande alors une investigation dans la modélisation et le choix de bonnes structures de stockage pour définir un modèle 3D pouvant supporter différentes analyses dans un espace 3D et dont la performance est fortement conditionnée par le choix de la structure de modélisation (Zlatanova et al, 2004). Partant des concepts liés aux SIG, Desgagné (2010) présente une liste de fonctionnalités associées à un SIG 3D:

- Construire, manipuler, gérer et présenter des primitives géométriques de type point, ligne, polygone et volume à l'aide de l'une ou de plusieurs structures géométriques 3D
- Gérer le stockage des modèles géométriques 3D au sein d'un SGBD.
- Offrir une interface graphique à l'utilisateur permettant d'attribuer des variables graphiques telles qu'une couleur, une épaisseur ou une texture aux primitives géométriques
- Gérer la sémantique des objets spatiaux 3D par la gestion de leurs propriétés descriptives.
- Réaliser l'analyse spatiale métrique et topologique 3D
- Diffuser des modèles 3D en particulier sur le Web à l'aide par exemple de techniques modernes comme les services Web.
- Être interopérable et adopter les différents standards offerts notamment par les principaux organismes de standardisation comme l'ISO et l'OGC.

L'analyse spatiale métrique et topologique est au cœur d'un SIG 3D. Elle doit tenir compte de l'ensemble des relations spatiales présentes dans un espace 3D. Plusieurs taxonomies des fonctions spatiales tridimensionnelles ont été proposées dans la littérature. Celle de Raper (2000) considère 6 fonctions spatiales relevant de l'analyse spatiale 3D: la visualisation; la transformation; la sélection; l'interrelation (métrique et topologique); la caractérisation et la construction (reconstruction d'objets sur base de primitives). Billen (2002) y ajoute l'interrelation de direction et l'interrelation dimensionnelle (Billen, 2002). Zlatanova et al (2004) proposent une classification des opérations spatiales selon différentes catégories. Ils distinguent les opérations de construction et de mise à jour des structures de données (contrôle de consistance, édition 3D, etc.); les opérations de sélection, de spécialisation et de navigation. Les opérations basées sur la géométrie et les relations spatiales sont les plus importantes. Elles peuvent être classées en opérations métriques, opérations de position, opérations de proximité, opérations basées sur les relations spatiales, etc. (Zlatanova et al, 2004). Les opérateurs spatiaux proposés par l'OGC peuvent servir comme référence au niveau des opérateurs topologiques. Alors que l'implémentation des algorithmes d'analyse spatiale métrique 3D est relativement bien documentée, le cas des algorithmes topologiques revêt une grande complexité par rapport à un espace 2D. En effet, du côté 2D, il existe des bibliothèques d'algorithmes d'opérateurs spatiaux topologiques comme par exemple la Java Topology Suite (JTS). Toutefois, ce genre de

librairie ne fournit pas encore des opérateurs topologiques spécifiques à la 3D (Desgagné, 2010). La complexité de la topologie fait que la recherche dans ce domaine est encore active. Elle s'oriente généralement vers l'adaptation des structures de modélisation pour un support efficace des requêtes topologiques. Nous citons dans ce cadre, la recherche faite par Ellul et Haklay (2009) qui proposent une structure B-Rep modifiée en vue d'optimiser les requêtes basées sur les relations binaires dans un espace 3D qui sont définies par le modèle des 9 intersections. Avec leur implémentation de types spatiaux 3D, les SGBD doivent inclure des fonctions d'analyse spatiale complexes pour assurer la performance des requêtes, les logiciels SIG doivent disposer d'outils pour l'import, la visualisation et l'exploration des données spatiales (Stoter et Oosterom, 2006 ; Arens et al, 2005).

D'un autre côté, le SIG 3D doit assurer la consistance entre les données 2D et 3D. En effet, Il est nécessaire pour un SIG 3D d'être en mesure d'afficher, de manipuler et d'interroger un modèle 2D et d'assurer une flexibilité de passage entre une représentation 2D et une représentation 3D (De Cambay, 1993). Ainsi, un utilisateur peut afficher et manipuler des données 2D tout en gardant l'exactitude de l'information 3D. Par exemple, s'il y a visuellement une intersection entre une rivière et un pont sur une projection en 2D, le système doit renvoyer une intersection 3D nulle. A cette fin, le processus doit prendre en compte les données 3D, même si une requête est faite sur données 2D (De Cambay, 1993). La recherche tend actuellement vers des modèles intégrés prenant en charge les données 3D et aussi intégrant des données 2D. L'ajout d'un niveau de détail Lod0 pour le bâtiment pour représenter son empreinte au sol dans la version 2.0 du CityGML (Gröger et Plümer, 2012) ainsi que la définition de différents profils géométriques 2D et 3D dans la norme INSPIRE en justifient l'utilité.

En résumé, un SIG 3D doit prendre en charge des fonctionnalités relatives à la gestion des données dans un espace 3D tout en assurant la consistance entre les données 2D et 3D et une flexibilité de passage entre les deux modèles. Les requêtes spatiales doivent faire référence à la réalité qui est tridimensionnelle.

1.4.4 Quelques projets SIG 3D dans la littérature

Les SIG 3D ne datent pas d'aujourd'hui. Plusieurs projets répertoriés dans la littérature ont été développés dans des contextes différents pour pouvoir combler le besoin devant l'insuffisance des solutions commerciales.

Une des premières réalisations en la matière est celle de Breunig (1999) qui a développé une application "*GeoStore/Geotoolkit*" pour une gestion des modèles géologiques 3D implémentés dans un SGBD orienté-objet "*ObjectStore*". Le modèle 3D est basé sur les primitives spatiales suivant une structure de "*Simplicial Complexes*". Cette application permet l'interrogation des modèles à travers le Web et l'exportation des données vers les formats Gocad (un logiciel de modélisation géologique), GML et VRML (Breunig et al. 2009) (cité par Desgagné, 2010). En 2004, Apel a présenté un projet de développement d'un SIG 3D orienté Web suivant une architecture distribuée (client-serveur-SGBD) qui est basée sur le couplage d'un outil de modélisation 3D (Gocad), d'une base de données XML et d'un serveur d'applications, avec une implémentation partielle des fonctionnalités d'analyse spatiale (Apel, 2004). Bédard et al (2006) ont développé un prototype de requêtes topologiques 3D "*TQuery*" qui permet l'exportation d'objets Gocad vers une structure de stockage 3D topologique implémentée dans un SGBD (SQL Server) qui régularise les

relations topologiques entre les objets 3D. Des analyses spatiales métriques et topologiques peuvent alors être effectuées automatiquement sur les données (Bédard et al, 2006) (Pouliot et al, 2008). D'autres projets se sont aussi penchés sur le thème du SIG 3D et ont produit des prototypes comme celui de Zlatanova (2000b) ou "*SpaceInfo*" de (Shi, 2003). Dans le cadre des recherches récentes, nous citons les travaux de Desgagné (2010) qui a développé un prototype SIG 3D: le Web Geological Feature Server (WGFS), qui s'appuie en grande partie sur des composants logiciels open source et donne accès en lecture et en écriture à partir du logiciel Gocad à des données géologiques 3D stockées en format XML dans une base de données MySQL. Koussa (2011) a développé un prototype SIG 3D orienté Web qui est aussi basé sur des technologies Open Source. Le prototype repose sur un modèle hybride combinant les méthodes B-Rep et CSG pour la modélisation des bâtiments, le modèle a été implémenté dans le SGBD libre PostgreSQL. Des algorithmes d'intégration des données Shapefile (*Shp*) et des fichiers de CAO (*dxf*, *dwg*) ont été développés pour alimenter la base de données spatiale. Le langage Java ainsi que l'API (*Application Programming Interface*) OpenGL ont été utilisés pour développer un moteur 3D pour le rendu tridimensionnel des objets.

1.4.5 Les SIG 3D commerciaux

Ces dernières années, des SIG prenant en charge des données spatiales 3D ont vu le jour comme Elyx 3D de la société Star-Apic et des applications SIG des compagnies Esri, Autodesk (Autodesk GIS Software, Autocad Map 3D) ou Bentley (Bentley Map).

Le SIG Elyx 3D de Star-Apic est une solution dédiée aux applications urbaines. Il s'agit d'un SIG 3D ouvert et interopérable qui offre la lecture native de nombreux formats de données vectoriels 2D ou 3D (*Shp*, *dxf*, *CityGML*,...) ainsi que des scènes 3D (COLLADA, 3DS, ...) et des fonctionnalités d'export de données dans des formats 3D reconnus (3DS, GML, dae,...). Il propose aussi des fonctionnalités d'analyse spatiale spécifiques à la 3D telles que l'intervisibilité et le buffer 3D pour les recherches de proximité et permet une gestion dynamique des différents Lod du CityGML (<http://www.star-apic.com>).

Bentley a mis en place une gamme nommée 3D City GIS pour la gestion de la 3D qui est construite autour du noyau Bentley Map V8i. Bentley Map s'appuie sur les fonctionnalités 3D de MicroStation et prend en charge les objets 3D d'Oracle Spatial et leur intégration dans Bentley Geospatial Server. Comme cette nouvelle version intègre en plus le traducteur universel FME, elle permet de lire et de manipuler des données en 3D dans de nombreux formats, dont le CityGML. VirtuelCity a développé un plugin nommé "*RCP*", intégré dans ArcGIS qui permet le stockage, la gestion, l'import-export de données 3D dans une multitude de formats dont le CityGML.

Certes, le marché des SIG est en pleine évolution et l'intégration de la 3D préoccupe les grandes firmes pour le développement de solutions innovantes prenant en charge la nouvelle dimension du territoire. Cependant, la visualisation de modèles 3D urbains reste la principale fonctionnalité dans les solutions développées. Les SIG commerciaux sont des systèmes qui sont spécialisés dans la gestion de données spatiales 2D. Ils peuvent lire certains formats 3D mais se limitent à la création de MNT et à l'extrusion de primitives géométriques 2D à l'aide d'une hauteur.

1.4.6 Stratégie de développement d'un SIG 3D

Nous abordons ici la question autour de la stratégie de développement d'un SIG 3D. L'objectif n'est pas de présenter les phases de son développement mais de discuter l'infrastructure technique autour de laquelle le SIG 3D peut se développer par rapport à des systèmes SIG ou DAO/CAO existants.

Plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour concevoir et développer une solution SIG 3D. Elles ont chacune des avantages et des inconvénients. Différentes solutions ont été présentées par Desgagné (2010), nous les analysons en faisant référence à des exemples concrets répertoriés dans la littérature.

La première stratégie considère le SIG 3D comme solution innovante qui se développe dans un contexte spécifique pour répondre à des objectifs précis. Il s'agit de faire ses propres conceptions et développements sans limitation par les outils existants. Si cette solution a l'avantage de concevoir des systèmes qui s'adaptent aux besoins prédéfinis et de dépasser les limitations enregistrées au niveau des solutions libres ou commerciales, elle a l'inconvénient d'être très coûteuse en termes de temps et de ressources. Cette stratégie a été adoptée par Koussa (2011) pour le développement d'un prototype SIG 3D dont les fonctionnalités d'intégration et de visualisation des données ont été développées par l'auteur.

La deuxième stratégie consiste à réutiliser un SIG existant et à étendre ses fonctionnalités à la 3D. En effet, les SIG 2D/2.5D offrent les fonctionnalités de base qui peuvent servir de noyau pour le développement d'un SIG 3D en leur ajoutant la gestion d'une primitive volumique. La prise en charge de la 3D demande une modification du schéma spatial décrivant les primitives géométriques et une adaptation des composantes du système à la nouvelle structure. Arens et al. (2003) avaient adopté cette solution pour implémenter une primitive spatiale volumique dans Oracle spatial 9i qui permet le stockage, la validation, l'indexation et l'interrogation d'un objet spatial 3D. Cependant, les opérations spatiales ne permettent pas de tenir compte de la troisième dimension et elles doivent être adaptées à la nouvelle structure. Le travail est moins difficile lorsque le système a une structure modulaire qui peut être évolutive. Nous citons ici l'exemple de la plateforme GeOxygene mise en place par le laboratoire COGIT à l'IGN pour le développement d'applications SIG 2D. La plateforme implémente le schéma spatial ISO 19107, d'où son potentiel d'évoluer vers une plateforme 3D. Le passage à la 3D a demandé une identification des impacts de la 3D: addition de classes géométriques 3D, insertion de bibliothèques de calcul 3D et l'intégration d'un Viewer 3D. Des classes géométriques ont été ajoutées et d'autres ont été étendues pour tenir compte de la troisième coordonnée et permettre des méthodes 3D (Brasebin, 2009).

Une troisième stratégie de développement d'un SIG 3D consiste à étendre les fonctionnalités d'un outil CAO pour profiter de ses capacités de modélisation géométrique 3D reconnues comme potentiel majeur de ces systèmes. Dans ce cas, le développement se situerait davantage au niveau des fonctionnalités liées à l'analyse spatiale et à l'interrogation des données descriptives qui vont se greffer sur la structure géométrique 3D. Cette solution a été adoptée par Desgagné (2010) dans le cadre du développement d'un SIG 3D construit sur la base d'un outil de modélisation 3D de type CAO qui a été couplé à un SGBD pour le stockage des modèles dans une approche de service Web.

1.4.7 Quelques questionnements autour d'un SIG 3D

Les SIG 3D émergent et peinent à répondre aux défis qui leur sont attribués. Leur mise en œuvre pose des problèmes conceptuels et techniques. La grande difficulté autour du développement d'un SIG 3D se situe au niveau de la modélisation 3D géométrique et topologique et la complexité autour de l'analyse spatiale dans un espace 3D. Nous présentons ici les principales questions autour des SIG 3D qui, à notre vue, constituent un handicap ou des contraintes limitant l'investissement dans une telle solution, d'une part et imposant des difficultés de développement et de réalisation d'autre part.

La difficulté est levée d'abord au niveau de la modélisation des données et le choix des structures de stockage. En effet, plusieurs structures de données existent pour la modélisation 3D géométrique et topologique et présentent chacune des avantages et des inconvénients (Rahman et Pilouk, 2008). A titre d'exemple, le modèle CSG est plus adapté pour la fabrication assistée par ordinateur alors que pour le monde réel, les objets et les relations deviennent plus complexes. Tandis que la représentation par voxels convient pour la modélisation de phénomènes continus mais son inconvénient est que les données de grande résolution demandent un espace mémoire très important et les objets à limites irrégulières ne peuvent pas être représentés (Stoter et al, 2006). Au niveau topologique, il n'y a pas de consensus sur un modèle topologique 3D unique (Stoter et al, 2006) et beaucoup de modèles topologiques 3D sont restés dans le domaine de la recherche. La modélisation géométrique et topologique 3D est fortement liée à l'application et doit se baser sur le choix de la structure permettant de représenter un grand éventail d'objets géographiques tout en étant facile à implémenter dans un SGBD. Aussi, le choix de structures 3D doit répondre à des spécifications d'interopérabilité à travers la conformité aux standards comme CityGML.

Le développement des opérations géométriques et topologiques dans un espace 3D est parmi les briques essentielles pour la réalisation d'un SIG 3D. La question n'est pas triviale vu que les développements conduits dans ce sens sont insuffisants au niveau analyse spatiale 3D et se limitent à des solutions ad hoc. Au niveau des systèmes commerciaux, les outils les plus présents sur le marché disposent de peu de fonctionnalités pour l'analyse spatiale 3D. Le logiciel ArcGIS offre plusieurs possibilités autant pour l'analyse métrique que topologique. Cependant, tous ces opérateurs métriques et topologiques ne sont utilisables que dans un environnement 2D. Par exemple, les opérateurs métriques d'ArcGIS sont incapables de calculer le volume d'une surface extrudée puisque l'objet est simplement volumique par apparence (Lachance, 2005). Il en résulte que le développement d'algorithmes performants pour la prise en charge de l'analyse spatiale 3D est un défi à prendre en charge par les SIG 3D.

1.5 Conclusion

De nos jours, les progrès technologiques offrent au monde de la géomatique des outils très performants d'exploitation de données 3D. Il serait alors une grande erreur de réduire l'usage de la 3D à une simple visualisation alors que les enjeux sont beaucoup plus prometteurs.

En dépit des réalisations qui ont marqué le domaine de la 3D, les SIG restent des systèmes ancrés dans le mode de pensée 2D, la troisième dimension est encore vue comme une fonction de la localisation et les solutions disponibles sont majoritairement qualifiées de 2.5D (Goodchild, 2010). La 3D est souvent perçue comme une forme supplémentaire de visualisation interactive sans interférer avec les modèles de données sous-jacents (Siret et

al, 2006). Le SIG 3D est une solution incontournable pour une gestion efficace de la troisième dimension. Mais, on parle souvent de "véritable" SIG 3D pour marquer le fait qu'une solution SIG 3D proprement dite n'est pas encore atteinte. En effet, les SIG actuels couplés aux SGBD spatiaux permettent la visualisation de modèles 3D mais offrent des fonctionnalités très limitées quant à la gestion et l'interrogation des données 3D. L'analyse spatiale 3D reste un grand défi qui se pose pour une véritable solution SIG 3D.

Il s'avère que les questions principales qui font le créneau de la recherche pour les SIG 3D sont essentiellement d'ordre technologique. Ce qui paraît logique vu que bon nombre de questions techniques ne sont pas encore résolues. La présentation des défis à prendre en charge par le SIG 3D apparaît dans la quasi-totalité des publications dans ce sens. En contrepartie, nous soulevons la question conceptuelle autour des SIG 3D : est ce que les méthodes disponibles pour la mise en place de solutions géomatiques sont facilement transposés dans un projet de conception d'un SIG 3D ?

CHAPITRE2. LES APPROCHES COLLABORATIVES EN GEOMATIQUE

2.1 Introduction

Nous assistons aujourd'hui à une grande révolution dans le paysage de l'information géographique. Les communautés, les usages et les outils ont connu un changement radical et de nouvelles pratiques se sont installées aussi bien dans le milieu professionnel qu'auprès du grand public. Ce changement semble faire une rupture technologique et culturelle par rapport aux méthodes traditionnelles de penser et gérer l'information géographique.

L'information géographique est complexe et hétérogène par nature et souvent distribuée entre plusieurs acteurs. Le besoin de son échange, les contraintes de sa production et de sa mise à jour ont fait naître de grandes orientations vers des formes collaboratives. Celles-ci suscitent aujourd'hui un grand intérêt auprès des professionnels vu leur potentiel dans la résolution des problématiques spatiales qui dépassent souvent les limites d'une seule organisation.

La révolution enregistrée dans le champ de l'information géographique touche tout naturellement les SIG. Il en résulte qu'au-delà de l'aspect technique et organisationnel, d'autres dimensions des SIG doivent être explorées. Notamment, la dimension sociale qui trouve place dans le rôle des innovations méthodologiques et technologiques dans le changement des valeurs et des pratiques sociales. On parle de SIG participatifs et de SIG collaboratifs pour désigner une nouvelle architecture technologique couplant les SIG avec des systèmes de communication pour la prise de décision spatiale au sein d'un groupe d'experts ou par un public non professionnel. Dans ce contexte, une redéfinition et une analyse des concepts liés à la participation et la collaboration nous paraît primordiale. Une telle analyse permet de se prononcer sur les pratiques nouvelles et statuer sur leur utilité, leurs apports et les mécanismes de leur intégration dans les processus traditionnels. Elle permet aussi de repenser les méthodologies, les outils et les usages au sein de ce nouveau paysage.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la collaboration : sa définition et ses enjeux ainsi que les formes collaboratives qui marquent le champ de la Géomatique. Nous présentons particulièrement le concept de SIG participatif et de SIG collaboratif dans la littérature et nous exposons notre propre vision autour du concept de SIG collaboratif en soulevant les principaux questionnements qui se posent pour l'adoption d'un tel système.

2.2 La collaboration en Géomatique

2.2.1 Typologie des relations inter organisationnelles

La donnée spatiale se trouve au centre de plusieurs problématiques. Il faut pouvoir, à tout moment, l'identifier, la localiser, se l'approprier et l'intégrer avec d'autres informations pour une prise de décision. Aussi, les données peuvent se situer à la croisée de plusieurs champs

disciplinaires impliquant plusieurs acteurs. Les objectifs ne se limitent pas au seul cadre technique à travers l'échange des données mais certaines problématiques spatiales exigent des relations inter organisationnelles formalisées pour entreprendre des actions communes. Dans ce contexte, Joliveau (2004) énonce quatre situations différentes autour de la formalisation des relations inter organisationnelles: la communication, la coopération, la coordination et la collaboration. Bien qu'il existe des similitudes entre les conducteurs ou les facteurs de motivation pour établir une relation inter organisationnelle, chaque environnement est généralement facteur de motivation individuelle (McDougall et al, 2005b)

La première situation est une situation de communication qui représente la forme de contact la plus simple qui n'est pas pilotée par un objectif défini. Les organisations s'informent mutuellement sur leurs activités mais sans un véritable souci d'harmonisation (Pornon, 1998; Joliveau, 2004). Dépassant le stade de communication, les organisations tendent à rapprocher leurs stratégies communes et partager des résultats. Deux formes inter organisationnelles s'inscrivent dans ce cadre: la coordination et la coopération, qui engendrent parfois des ambiguïtés dues possiblement à des nuances différentes dans l'utilisation de ces termes entre culture francophone et anglo-saxonne.

La coordination est une pratique qui se base sur une harmonisation des actions et une gestion des interdépendances entre plusieurs activités individuelles qui visent un objectif défini (Consoli et al, 2006), à travers par exemple des échanges d'expériences, de méthodes et de données (Pornon, 1998). Dans le même sens, Schermerhorn (1975) (cité par Dedekorkut (2003)) définit la coordination comme: «*The presence of deliberate relations between otherwise autonomous organizations for the joint accomplishment of individual operating goals*». Rogers et Whetten (1982) (cité par Anandarajan (2010)) définissent la coordination comme «*The process whereby two or more organisations create and/or use existing decision rules that have been established to deal collectively with their shared task environment*»

La coopération vise des réalisations communes qui s'inscrivent dans un contexte précis. La saisie ou l'actualisation de données entre partenaires, la réalisation de catalogues de données communs et l'échange de données entre partenaires nécessitant une concertation, un effort de mise en cohérence ou une certaine répartition des responsabilités relèvent de cette catégorie (Pornon, 1998). Il en résulte que la coopération suscite un degré de partenariat entre les acteurs plus important que dans la coordination. Elle formalise les actions vers un but commun mais n'implique pas forcément une dépendance totale. Les résultats des actions sont communiqués dans le groupe mais les objectifs individuels sont sauvegardés (Belkadi et al, 2004; Pornon, 1998). D'un autre côté, Dedekorkut (2003) considère que la coordination est plus formelle que la coopération et nécessite plus de ressources et une plus grande interdépendance entre les organisations.

Il s'avère, à travers les définitions précédentes, que les interprétations des concepts de coordination et de coopération sont sujettes à des ambiguïtés vu la proximité sémantique entre les deux concepts. De notre part, nous adoptons la définition suivante: «*La coordination est l'opération d'harmoniser les actions et de gérer les interdépendances entre plusieurs organisations pour aboutir à un objectif commun. Les contributions sont individuelles mais sont harmonisées et homogénéisées pour être efficaces. Tandis que la coopération met en interaction plusieurs acteurs qui travaillent ensemble pour atteindre un but commun tout en sauvegardant leur identité organisationnelle*»

La collaboration trouve place dans les pratiques des organisations lorsque celles-ci atteignent un niveau de maturité et optent pour des objectifs plus ambitieux en mettant en œuvre leur patrimoine informationnel et en partageant les traitements, les méthodes et les outils pour atteindre ces objectifs (Joliveau, 2004). La collaboration peut être vue comme une extension et une inclusion de la coopération et la coordination (McDougall et al, 2005a).

En résumé, les relations inter organisationnelles existent sous différentes modalités dans lesquelles les interactions entre les acteurs débutent par une simple communication et évoluent vers des formes d'harmonisation des actions et de réalisation d'objectifs communs. De la communication, passant par la coopération et la coordination, la collaboration est la forme la plus évoluée des relations inter organisationnelles (Fig2.1) à laquelle plusieurs auteurs portent intérêt comme pratique potentielle dont les apports sont très prometteurs.

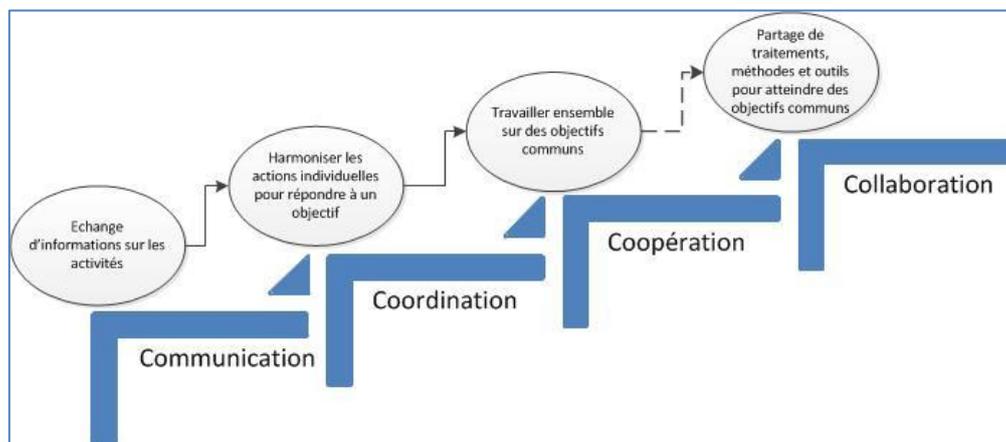


Fig2. 1. Evolution des relations inter organisationnelles vers la collaboration

2.2.2 Le concept de collaboration

Le concept de collaboration a fait objet de plusieurs définitions qui partagent des principes communs. Gray (1989) (cité par London (1995)) décrit la collaboration comme: « *The process through which parties who see different aspects of a problem can constructively explore their differences and search for solutions beyond their own limited vision of what is possible* ». Les mêmes principes de la collaboration sont repris dans la définition de Roche (2009): « *On peut parler de collaboration lorsqu'un groupe de personnes se réunit, poussé par un intérêt commun, pour explorer de façon constructive de nouvelles possibilités et créer quelque chose qu'elles n'auraient pas pu créer seul* ». La collaboration désigne des activités coopératives où plusieurs individus travaillent ensemble sur une tâche commune ou des sous tâches fortement connexes pour construire et maintenir une conception collaborative d'un problème (MacEachren et Brewer, 2004). Une des particularités fondamentales de la collaboration réside dans sa mise en œuvre autour d'une vision commune, ce qui n'est pas requis dans les autres formes partenariales comme la coordination et la coopération (London, 1995).

Plusieurs auteurs comme (McDougall et al, 2005b; Belkadi et al, 2004; Dedekorkut, 2003; Pornon, 1998) ont bien cerné les différences entre coopération, coordination et collaboration. Les différentes contributions mettent le point sur deux dimensions importantes de la collaboration: la recherche de l'intérêt commun et l'infaisabilité individuelle. La collaboration est plus qu'une simple coordination où on cherche à atteindre un objectif global en travaillant

de manière indépendante. Elle dépasse aussi le stade de la coopération qui suppose que chacun pourrait seul réaliser la tâche (Roche, 2009).

Du point de vue mise en œuvre d'une action de collaboration, Serge K. Levan (cité par Roche (2009)) décrit la collaboration comme un processus cyclique articulé autour de quatre phases: la co-analyse (diagnostic pour se construire un référentiel cognitif); la co-définition (d'une stratégie qui permet de partager une vision sur le résultat à atteindre et la démarche à mettre en œuvre); la co-réalisation (des actions et suivis de l'avancement du travail collaboratif); et la co-évaluation (des résultats intermédiaires et le pilotage du processus collaboratif) (Roche, 2009). Cette définition montre que l'action collaborative est présente dans toutes les phases autour de la réalisation d'un objectif commun, depuis la conception et l'analyse jusqu'à l'évaluation.

2.2.3 Enjeux autour de la collaboration

Avec la multiplicité des actions qui se développent à plusieurs échelles du territoire, les organisations ont intérêt à s'organiser dans des formes collaboratives et entreprendre des actions communes pour faire face à plusieurs problématiques spatiales à travers la définition d'objectifs communs. L'approche de collaboration sous ses différentes formes (coordination, coopération, etc.) est devenue aujourd'hui un incontournable dans les actions régionales, nationales et internationales (comme la directive européenne INSPIRE) pour enrichir et acquérir de nouvelles connaissances sur le territoire. A une échelle globale, la collaboration autour de l'information spatiale permet de faire face à la gestion de plusieurs problématiques environnementales, sociales, etc qui se posent aux gouvernements (Warnest, 2005).

En Géomatique, les enjeux de la collaboration sont multiples: décloisonnement des activités organisationnelles, la recherche de nouvelles méthodes de travail, le partage de connaissances et de savoir-faire, etc. (Pornon, 1998). Du côté opérationnel : l'acquisition à frais partagés, essentiellement pour les référentiels cartographiques; le catalogage pour le partage de métadonnées; l'échange; la diffusion et la coproduction des données; l'augmentation de la fréquence des mises à jour des données; le partage des coûts, etc. (Noucher, 2006).

L'un des enjeux majeurs de la collaboration en Géomatique est la coproduction des données. C'est une forme d'élaboration collaborative des données par la définition de spécifications communes et la conception de nouveaux processus de collecte. La coproduction permet de résoudre les problèmes d'hétérogénéité sémantique en tentant de confronter des points de vue d'experts sur une thématique donnée et de rapprocher leurs visions. Les données coproduites pourront ainsi être échangées et intégrées facilement dans les processus décisionnels. C'est une façon de régler les discordances et les différences avant que la donnée ne soit mise sur le chemin de la diffusion. D'un autre côté, la collaboration est aussi utile pour la conception coopérative d'ontologies qui consiste à définir un vocabulaire formalisé regroupant l'ensemble des concepts et relations intervenant dans un domaine donné (Keita, 2007) pour permettre l'interopérabilité et faciliter l'intégration des données.

2.3 La collaboration dans la production de l'information géographique

2.3.1 La culture participative en Géomatique

La Géomatique est une science qui se développe autour de l'information géographique mais qui a puisé son évolution de la grande révolution informatique (Joliveau, 2004). Elle est vue comme une construction d'un champ de pratiques et de savoirs qui trouve sa prospérité dans la numérisation des technologies de l'information et l'évolution de l'informatique. Bien que la Géomatique est fortement influencée aussi par des innovations technologiques non informatiques (Joliveau, 2004).

La composante technologique joue un rôle primordial de facilitateur dans l'épanouissement des sciences géomatiques grâce aux plateformes web collaboratives qui carburent au travail social et coopératif (Mericskay et Roche, 2010). Le concept de "*User Driven Innovation*" (innovation pilotée par les usagers) a été introduit par Eric Von Hippel (1988) (cité par Rieder, 2008) pour désigner une méthode de conception qui part de l'idée que l'utilisateur, avec les moyens à disposition, devient un contributeur volontaire au développement. Google Maps et OpenStreetMap (OSM) sont des exemples très illustrateurs de ce phénomène de production communautaire volontaire (Rieder, 2008).

Après être longtemps réservée aux spécialistes, la géomatique actuelle se démocratise et se caractérise de plus en plus par des usages grand public (globes virtuels, GPS, services mobiles géolocalisés, etc.). Dans un nouveau contexte qui dépasse l'univers professionnel, plusieurs néologismes sont apparus pour décrire une grande vague de pratiques participatives orientées grand public qui tournent autour de la création de contenu géographique sur le web, notamment la *néogéographie* (Turner, 2006; Bakis et al, 2010), la *Géomatique 2.0* (Joliveau, 2008), le *Web-Mapping 2.0* (Haklay et al, 2008), *Maps 2.0* (Crampton, 2009), etc.

2.3.2 Les formes de production collaborative

Dans un contexte de production classique, des producteurs institutionnels produisent les données et les mettent à disposition des utilisateurs selon une approche top-down. Les données sont communiquées à travers des géo portails ou des services web selon un flux unidirectionnel monopolisé par un organisme central. Aujourd'hui, d'autres formes de production comme le crowdsourcing et la coproduction commencent à susciter l'intérêt des grands producteurs de données. Ces formes de production émergentes s'inscrivent dans le courant de la Géomatique collaborative, même si elles réfèrent à deux cadres différents: le crowdsourcing est une forme de production communautaire alors que la coproduction s'insère dans un cadre professionnel.

2.3.2.1 Le crowdsourcing

Le Géoweb qui désigne la convergence du Web, des technologies géospatiales et de l'information géographique (Mericskay et Roche, 2010) a apporté un changement radical dans les modalités établies de production et de mise à jour de l'information géographique (Batty et al, 2010). Sa dimension participative a conduit à un renversement de paradigme dans la conception des données spatiales et une rupture avec la logique descendante de production des données. Aujourd'hui, une grande partie de l'information géographique est produite, enrichie, mise à jour et diffusée par les internautes (Mericskay et Roche, 2010). Ce

phénomène, désigné par le terme crowdsourcing a été baptisé par Goodchild (2007) sous le concept «Information Géographique Volontaire» (connu sous l'acronyme VGI: *Volunteered Geographic Information*). OSM et d'autres comme Google Maps Maker et Wikimapia sont des exemples de projets qui attirent un nombre impressionnant de participants et démontrent un engouement vers les contributions volontaires des internautes. D'autres exemples comme le projet *SpotCrime* et le projet *Ushahidi* orientent la production de VGI pour des besoins spécifiques comme la cartographie de la criminalité pour *SpotCrime* (www.spotcrime.com) et la cartographie sociale pour *Ushahidi* (www.Ushahidi.com).

La production de la VGI touche aussi le domaine de la 3D. *KOSMOS Worldflier* et *OSM-3D* (*OSM-3D*, 2011) sont des exemples produisant la VGI 3D pour des modèles numériques de terrain et des bâtiments 3D. Cependant, à notre connaissance, les bâtiments se limitent à une représentation en blocs et aucune information sur le toit n'est disponible pour le moment (*Fig2.2*). La potentialité de l'information 3D volontaire a été investiguée pour l'extraction de modèles 3D en format CityGML à partir des données OSM-3D en vue de générer des Lod1 et Lod2 via un mapping entre les attributs sémantiques et une extraction des géométries (Goetz et Zipf, 2012a; Goetz et Zipf, 2012b).



Fig2. 2. Visualisation 3D dans OSM-3D (*OSM-3D*, 2013)

L'information volontaire a incontestablement amélioré l'information géographique de plusieurs façons. Elle a rendu disponibles d'énormes quantités de données et a considérablement amélioré la connaissance sur le plan géographique en tirant profit du grand savoir disponible chez les internautes autour de leurs localités. A titre d'exemple, la VGI est particulièrement intéressante pour les gouvernements ayant des ressources limitées pour l'identification et le suivi des risques (Budhathoki et al, 2010).

L'information produite par crowdsourcing commence à susciter un grand intérêt auprès des producteurs de données de référence. Nous citons le cas de la plateforme web *RiPart* (Remontée d'Information Partagée) développée par l'Institut Géographique National (IGN) en France pour collecter des remarques sur les données et des informations transmises par des partenaires sur le web (Vigliano, 2011). Grâce à l'expérience acquise avec *RiPart*, l'IGN a mis en place sur le site Géoportail de l'IGN, un outil de signalement d'erreurs, d'évolutions ou d'omissions afin de permettre au grand public de participer à la mise à jour du référentiel géographique. Des contrôles qualité sont effectués par l'unité de qualité en suivant des spécifications qui précisent les seuils acceptables pour les indicateurs de qualité.

Si la VGI constitue une grande motivation pour les professionnels, son adoption et son intégration dans les processus traditionnels engendre des défis majeurs en termes de précision, de cohérence et l'authenticité, par rapport aux processus institutionnels existants. Il faut ainsi trouver les moyens de réinventer les cadres institutionnels et les pratiques organisationnelles pour sa mise en œuvre (Budhathoki et Sieber, 2011). Plusieurs auteurs comme Neis et al (2011) et Amelunxen (2010) voient dans OSM l'application potentielle pour qualifier la VGI en général. En effet, la communauté OSM participe activement à la gestion de la qualité. Certaines erreurs sont signalées sur *OpenStreetBugs* et d'autres sont détectés automatiquement par les outils web comme *Keepright* (<http://keepright.ipax.at>) et *Osmose* (<http://osmose.openstreetmap.fr/map>). L'évaluation de la VGI d'OSM par rapport aux données propriétaires provenant d'organismes professionnels a été sujette à plusieurs études. Celle conduite par Haklay et al (2008) a porté sur la comparaison de la VGI d'OSM avec un jeu de données de référence d'*Ordnance Survey*. Les résultats obtenus dévoilent une exactitude positionnelle raisonnable et une bonne couverture des données OSM par rapport aux données d'*Ordnance Survey* (Haklay et al, 2008). Cependant, l'analyse démontre l'inconsistance de la VGI en termes de qualité et son incomplétude par rapport aux données de référence. Cette incomplétude a été aussi dévoilée par Zielstra et Zipf (2010) qui ont mené une étude comparative des données d'OSM par rapport aux données de *TeleAtlas*. Cette dernière étude a aussi mis l'accent sur le caractère hétérogène de la distribution des données OSM entre les zones urbaines et rurales où le taux de contribution est plus faible.

Les méthodes classiques d'évaluation de la qualité ne prennent pas en compte la dimension collaborative. La motivation des contributeurs est fortement reliée à la crédibilité de la VGI (Flanagin et Metzger, 2008; Coleman et al, 2009). Dans ce contexte, Bishr et Janowicz (2010) ont conçu un modèle spatiotemporel fondé sur des critères de confiance et de réputation afin de qualifier les contributions de VGI. Brando et Bucher (2010) proposent une approche basée sur la définition de spécifications pour l'information volontaire. Dans cette approche, les utilisateurs sont assistés pour la saisie de spécifications sur l'information à produire. Des mécanismes automatisés sont ensuite utilisés pour réconciliation des conflits éventuels. Bishr et Mantelas (2008) proposent une autre méthode: l'évaluation de la qualité et la crédibilité basée sur la proximité du contributeur par rapport au site, sa réputation auprès des autres utilisateurs et la fréquence des observations provenant de différentes sources.

2.3.2.2 La coproduction

La coproduction s'inscrit dans le cadre de l'élaboration collaborative de l'information par la conception de nouveaux processus de collecte des données. Un des enjeux potentiels autour de la coproduction est le partage des coûts d'acquisition des données et leur mise à jour. C'est aussi une façon d'anticiper et de régler les discordances sémantiques et techniques qui résultent du croisement de plusieurs jeux de données provenant de productions individuelles, via un accord sur des spécifications communes. La coproduction des données de référence engage moins de difficultés que la coproduction des données thématiques, ces dernières soulèvent plusieurs hétérogénéités sémantiques dues à la diversité des cultures professionnelles. La question fondamentale autour de la coproduction des données est de pouvoir confronter les différentes visions, les rapprocher pour produire une donnée qui répond aux exigences et besoins des différents acteurs. Ainsi définie, la

donnée coproduite devient un objet de collaboration qui dépasse les contextes organisationnels.

La production collaborative des données géographiques revêt un intérêt particulier dans le cas de la 3D. Nous partons du constat suivant: les problèmes d'incohérences techniques et sémantiques inhérents à l'intégration des données provenant de référentiels géographiques 2D et leur réutilisation dans de nouveaux contextes sont le grand frein à l'échange inter-organisationnel et l'instauration d'actions collaboratives centrées sur les données géographiques. Si la mise à jour est la préoccupation majeure pour les bases de données 2D, celle autour de la 3D se situe encore au stade d'acquisition pour un bon nombre d'organismes producteurs des données de référence. La coproduction ne serait-elle pas une solution potentielle pour unifier les spécifications des données 3D à produire? Pour notre part, la réponse est affirmative. En effet, la coproduction permet de définir les données 3D dans un cadre commun portant sur les aspects techniques et sémantiques à travers un accord sur les formats, le standard de représentation ainsi que la sémantique à attribuer aux données en vue de les rendre interoperables et les intégrer dans une future infrastructure de données spatiales 3D. En plus du cadre de définition, la donnée coproduite est acquise et mise à jour à des frais partagés entre plusieurs organismes, ce qui répond à l'incapacité individuelle d'acquérir des référentiels 3D et d'assurer leur mise à jour.

2.4 Quelques formes collaboratives en Géomatique

La collaboration ne doit pas se limiter aux seuls aspects techniques et informatiques. Sa mise en œuvre et son succès sont conditionnés par la formalisation d'actions qui permettent aux acteurs de s'organiser, de communiquer et de partager leurs expériences. Les formes collaboratives en Géomatique se distinguent selon leurs objectifs et le degré d'interactions entre les acteurs. Alors que les infrastructures de données spatiales focalisent sur des problèmes de compatibilités technologiques ou sémantiques autour de l'échange de données, les communautés de pratiques et la géocollaboration sont deux approches qui n'ignorent pas la dimension technique de la collaboration, mais dans lesquelles les aspects humains, organisationnels sont très présents (Noucher, 2006; Noucher et al, 2006). Les formes collaboratives touchent aussi le domaine des SIG à travers le concept de SIG collaboratif.

2.4.1 Les Infrastructures de Données Spatiales (IDS)

La donnée spatiale est reconnue comme une source potentielle qui doit être gérée, maintenue et mise à jour dans le cadre d'une infrastructure qui assure sa diffusion au sein d'une large communauté d'utilisateurs. Une telle infrastructure repose sur une stratégie, un cadre institutionnel et une architecture technologique. Classiquement, les Infrastructures de Données Spatiales (IDS) se définissent selon cinq composantes fondamentales (Douglas, 2004): des informations géo référencées; des accords techniques et organisationnels; une documentation (métadonnées); des mécanismes de découverte et de consultation des données et des méthodes d'accès aux données spatiales (*Fig2.3*). L'utilisateur et les données constituent les éléments clés dans une IDS interagissant dans un cadre dynamique (Rajabifard et al, 2002) (*Fig2.4*) qui relève de l'évolution technologique et aussi de celle des besoins et des applications. Les IDS sont ainsi des systèmes à la fois techniques, sociaux, organisationnels et économiques (Rodriguez, 2005) qui, en mettant en valeur les technologies de l'information et des communications, visent à démocratiser l'accès et

l'utilisation de l'information sur le territoire, dans le but de la rendre plus utile à tous les niveaux de la société (Ryttersgaard, 2001) au-delà de son contexte de création. La notion d'Infrastructure de Données Spatiales est l'une des illustrations les plus révélatrices des préoccupations actuelles de partage et d'échange des données géographiques (Noucher, 2009a).

Aujourd'hui, des IDS se développent à tous les échelons du territoire pour valoriser et faciliter la diffusion et l'échange de l'information documentée et standardisée (Rajabifard et al, 2002; Maguire et Longley, 2005). Le développement d'IDS peut dépasser le cadre régional et national pour atteindre une échelle plus grande. C'est le cas de la directive INSPIRE initiée en 2007 par la commission européenne afin d'instaurer des règles générales qui obligent les Etats membres à mettre à disposition pour consultation leurs métadonnées et les données utilisées ayant un caractère environnemental (Craglia et Annoni, 2007; Hansen et al, 2011).

Les IDS offrent ainsi une assise fondamentale pour le développement d'une géomatique collaborative. Cependant, leur mise en place est une action complexe et dynamique (Chan et al, 2001) nécessitant une mobilisation massive de la part de tous les acteurs concernés et une bonne démarche méthodologique collaborative. Les aspects techniques étant suffisamment maîtrisés par la disponibilité de solutions open source qui supportent un large éventail de standards et assurent ainsi une interopérabilité entre les composantes d'une IDS (Steiniger et Hunter, 2012)

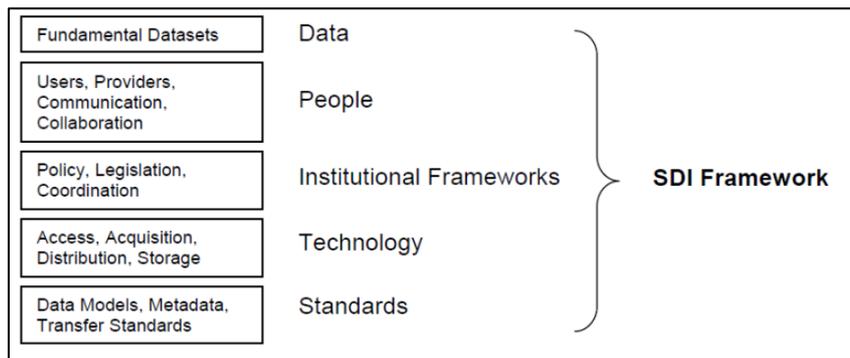


Fig2. 3. Les composantes d'une IDS

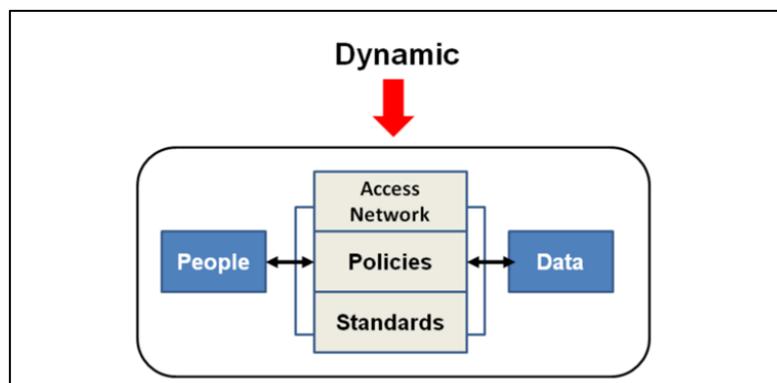


Fig2. 4. Interactions entre le public et les données dans le cadre d'une IDS (Rajabifard et al, 2002)

Les infrastructures de données spatiales sont des systèmes qui visent la démocratisation de l'accès et l'utilisation de l'information géographique en vue de promouvoir la participation et la collaboration dans la gestion du territoire. De par leur nature, leurs composantes et leurs enjeux, les IDS font appel à la composante collaborative même si celle-ci est focalisée sur la dimension technologique et que les aspects de mutualisation des connaissances ne sont pas pris en charge (Noucher, 2009a). Cette dimension collaborative a été soulevée par Warnest (2005) dans sa proposition de modèle collaboratif pour les IDS nationales dans les pays fédéraux. Dans son modèle, la stratégie de collaboration porte sur les interactions des organisations pour fournir un ensemble de principes directeurs à prendre en considération avant d'entrer dans une forme de collaboration autour d'une IDS. Mais il considère que les partenariats autour des données est la forme de collaboration la plus investie (Warnest, 2005). Au-delà de l'objectif de leur mise en œuvre, les IDS sont vues comme des jalons importants pour baliser le chemin vers le développement d'autres formes collaboratives.

2.4.2 Les communautés de pratique (CDP)

La gestion territoriale est une action qui implique plusieurs acteurs ayant des modèles différents, construits autour d'une culture à la fois professionnelle et personnelle. Les projets communs génèrent un contexte d'apprentissage autour de l'information géographique et font émerger une compréhension partagée du territoire au-delà du cadre intra-organisationnel. Un apprentissage collectif produit des pratiques au sein d'une communauté d'acteurs désignés par des communautés de pratique (Noucher, 2006). Le concept est issu du domaine de la gestion de connaissance (*Knowledge Management*) et reflète la façon dont les acteurs, dans les organisations ou les réseaux professionnels, peuvent s'organiser pour faciliter l'apprentissage individuel et collectif et la résolution de problèmes basés sur la collaboration et le partage de connaissances (Noucher, 2006; Pornon et Noucher, 2007).

Le concept a été introduit par Wenger (1998) (cité par Chanal (2000) et Noucher (2009a)) qui définit les communautés de pratique (CDP) «*comme un groupe de personnes qui partagent un même intérêt pour une entreprise humaine et est engagé dans un processus d'apprentissage collectif qui les relie entre elles*». Ce groupe est motivé par des intérêts communs et des projets similaires, coopère et échange l'expérience et partage les ressources (savoirs, expériences, documents) pour un apprentissage mutuel et la création d'une valeur collective autour de l'information (Noucher, 2006; Pornon et Noucher, 2007). Trois dimensions permettent de caractériser le type de relation qui fait qu'une pratique constitue la source de cohérence d'un groupe d'individus: l'engagement mutuel, une entreprise commune, et un répertoire partagé de ressources (Chanal, 2000). La pratique est créée par des individus qui s'engagent dans des actions qui naissent et se développent dans un cadre de négociation. La communauté de pratique ne se réduit pas à un groupe de travail ni à des actions intervenant sur un même territoire, mais elle est conditionnée par le sens de la négociation et la collaboration entre les acteurs (Noucher, 2006). Ainsi, des clubs d'utilisateurs, des comités techniques SIG, un forum d'utilisateurs, les blogs ne forment pas de CDP par absence d'engagement mutuel et la présence d'utilisateurs non actifs (Noucher, 2006). Une autre définition proposée par (Livre Blanc, 2004) considère une CDP comme un groupe d'individus reliés de manière informelle et fonctionnant en réseau. Ce groupe est motivé par des intérêts communs et des projets similaires, coopère et échange l'expérience et partage les ressources (savoirs, expériences, documents) pour un apprentissage mutuel et la création d'une valeur collective autour de l'information tout en assurant un mariage entre la culture commune et un système cohérent d'intérêts individuels. Une CDP est aussi

définie comme un groupe auto-organisé, d'individus partageant le même centre d'intérêt et qui, par des interactions régulières, développent des pratiques et des expertises partagées générant ainsi une identité commune (Dameron et Josserand, 2007).

Les objectifs potentiels autour de la création des communautés de pratiques sont focalisés sur l'apprentissage autour de référentiels métier, par le partage d'expériences, la confrontation d'idées et le croisement de compétences. Ils visent aussi l'accélération de l'innovation et la maîtrise d'un champ de pratiques ainsi que la mutualisation des ressources, parfois rares (Livre Blanc, 2004). Cependant, leur mise en place ne peut échapper à des freins qui sont principalement dus aux divergences sémantiques entre les acteurs et aussi à leurs divergences sur les objectifs. Les objectifs opérationnels assignés aux dynamiques de partage des données géographiques dans les deux logiques d'actions: Infrastructure de Données Spatiales et Communautés De Pratiques sont illustrés par la figure 2.5 (Noucher, 2006) qui montre que la dimension collaborative dans les communautés de pratiques est plus importante et vise des objectifs plus importants comme la coproduction des données.

Finalement, les communautés de pratique constituent l'un des fondements de l'intelligence territoriale. En plus des dispositifs techniques, les dispositifs collaboratifs autour de l'information géographique doivent se transformer en véritables réseaux géomatiques apprenants (Noucher, 2012). *«En associant les acteurs et la communauté d'un territoire à la mutualisation de l'information et à leur exploitation coopérative, l'intelligence territoriale améliore, dans un processus interactif, itératif et prospectif, leur compréhension de la structure et des dynamiques du territoire et leur maîtrise collective du développement territorial.»* (Girardot, 2004).

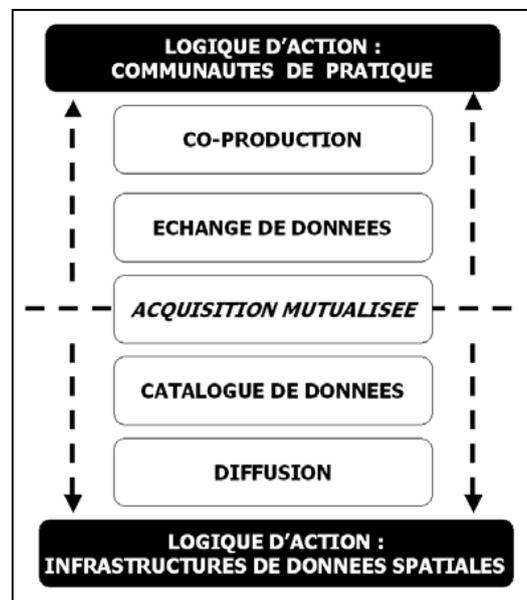


Fig2. 5. Objectifs opérationnels autour des IDS et des CDP (Noucher, 2006)

2.4.3 La géocollaboration

Les formes collaboratives utilisant les données géographiques et les technologies géomatiques sont désignées par le terme de géocollaboration (Pornon, 2007; MacEachren et Brewer, 2004). Schafer et al (2007) définissent la géocollaboration comme *«A multiple people working together to solve a geospatial problem»*. La géocollaboration est associée au

concept de CSCW (*Computer-Supported Cooperative Work*) (Chang et Li, 2012), en français TCAO (*Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur*) qui est un champ multidisciplinaire englobant l'informatique, l'intelligence artificielle, la sociologie et la psychologie. Le CSWG est souvent assimilé aux techniques du Groupware (Chang et Li, 2012), défini par (Ellis et al, 1991) comme « *un système informatisé qui soutient le travail des groupes de personnes pour un but commun et qui fournit une interface pour un environnement partagé* » (cité par Keita, 2007)

La géocollaboration a été souvent associée aux processus de prise de décision. Elle est considérée, aussi bien que les PSS (*Planning Support Systems*), comme une implémentation des GSDSS (*Group Spatial Decision Support Systems*) (Balram et Dragicevic, 2006). Plusieurs architectures technologiques de géocollaboration ont été développées pour des fins de prise de décision, notamment pour la gestion des risques (Schafer et al, 2007) ou la géo visualisation dans un environnement collaboratif (MacEachren et Brewer, 2004 ; Wu et al, 2009).

Dans une situation de géocollaboration, les acteurs doivent utiliser un système d'information commun ou leurs outils respectifs pour assurer une coordination. Un niveau d'interopérabilité est exigé pour pouvoir travailler ensemble avec les données multi-sources. La géocollaboration désignée par le « *Travailler et agir ensemble* » se situe au premier rang des formes collaboratives du point de vue niveau de convergence entre les acteurs et aussi au niveau complexité de mise en œuvre (Noucher, 2009) (Fig2.6).

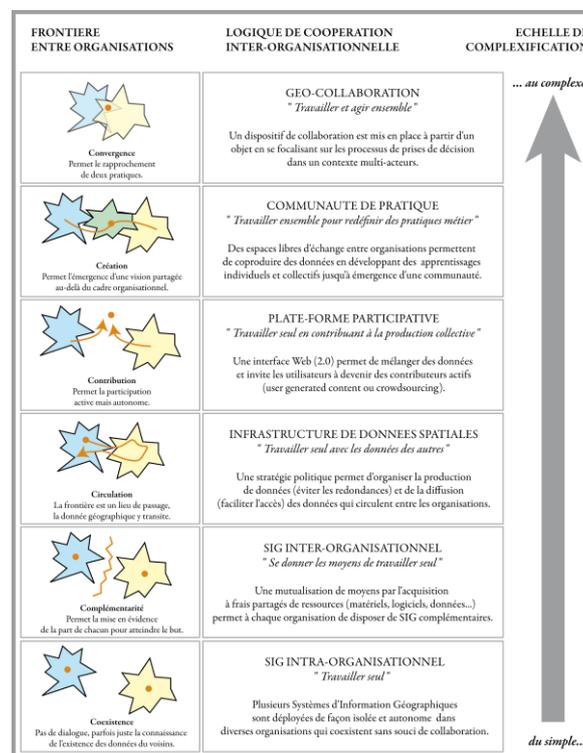


Fig2. 6. Evolution des formes collaboratives vers une Géocollaboration (Noucher, 2009)

2.4.4 Les SIG Collaboratifs

Bien que les SIG aient connu une longue période de gestation et de mûrissement au niveau de leur construction technique et conceptuelle, leur concept fait toujours objet de plusieurs interprétations et visions. Les définitions du SIG convergent, implicitement ou explicitement, vers son caractère multidimensionnel (Joliveau, 2004). En effet, le SIG est vu comme boîte à outils, comme environnement informatique, comme base de données géo référencées, comme méthode de gestion intégrée d'information spatiale et aussi comme système d'information d'une organisation.

Les premiers objectifs assignés aux SIG étaient d'ordre technique, centrés sur l'automatisation de la cartographie et la performance dans l'intégration et la gestion des données (Pornon, 2007). En plus de leur composante technique, Joliveau (2004) soulève l'importance de la dimension sociale du SIG et propose une organisation du concept autour de trois conceptions: une conception basée sur une construction technique, une conception qui considère le SIG comme système d'information d'une organisation et une troisième conception qui envisage le SIG comme construction sociale, politique et culturelle, qui trouve place dans le rôle des innovations technologiques et le changement des pratiques sociales autour de l'information géographique (Joliveau, 2004). Le SIG social permet de valoriser la connaissance spatiale locale (Dunn, 2007). Ainsi défini, le SIG est vu comme une superposition de couches reliées entre elles par des protocoles dans un contexte de coordination et de communication qui recentre les SIG sur leur contribution à la compréhension du territoire et à l'amélioration de la transversalité dans les organisations (Fig.2.7).



Fig2. 7. Représentation du SIG sous forme d'un modèle en couches (Joliveau, 2004)

2.4.4.1 Des SIG intra-organisationnels...Vers des SIG collaboratifs

Avec le besoin accentué d'échange des données et des connaissances qui se pose à toute organisation, le SIG intra organisationnel trouve sa limite. Un SIG conçu par et pour l'organisation borne le cadre d'usage de l'information dans un contexte spécifique. Les SIG collaboratifs apparaissent comme solution potentielle qui dépasse les limites actuelles de tels systèmes et les placent face à de nouveaux besoins collaboratifs.

La littérature a abordé le sujet de la collaboration et des SIG selon deux concepts: le SIG participatif et le SIG collaboratif dans lesquels la collaboration prend deux perspectives différentes.

2.4.4.2 Les concepts de SIG Participatif, SIG collaboratif dans la littérature

Dans les années 1990, plusieurs chercheurs ont commencé à explorer des sujets impliquant l'aide à la décision, la participation communautaire, la participation du public et les SIG. Dans ce contexte, le SIG participatif est apparu comme une intégration de connaissances locales selon des approches participatives incluant les technologies de l'information géographique dans les processus de prise de décision (Jankowski et al, 2009). A travers la participation du public dans les processus décisionnels, les SIG participatifs tendent à valoriser la dimension sociale des SIG (Elwood, 2006; Dunn, 2007). La prise de décision spatiale selon une approche participative requiert la mise en œuvre d'une infrastructure numérique intégrant les SIG avec d'autres technologies de l'information et de communication (TIC) pour le support d'analyse et de prise de décision au sein d'un groupe communautaire (Campagna et Deplano, 2002; Voss et al, 2004; Geertman, 2002).

La prolifération des technologies de l'information a considérablement amélioré les processus de planification urbaine (Doyle et al, 1998; Huang, 2003). Les SIG web ont démontré leur potentiel dans les designs urbains communautaires impliquant un public non professionnel (Drummond et French, 2008). Une des premières investigations du potentiel des SIG web pour supporter la participation du public dans la prise de décision a été faite par le CCG (Centre for Computational Geography) à l'université de Leeds (Kingston et al, 1999). Au début, les SIG Web participatifs étaient basés sur une cartographie 2D, puis des technologies 3D ont été intégrées pour fournir une visualisation intuitive du design urbain (Wu et al, 2010). Des applications SIG 3D sur le web ont fourni un moyen pour modéliser l'environnement urbain sur base de l'extrusion de cartes 2D (Yao et al, 2006) pour se passer de la difficulté d'acquérir des modèles 3D plus précis. Plusieurs exemples de systèmes participatifs ont été développés pour aider à la planification et la simulation urbaine 3D (Huang, 2003) en utilisant des formats de visualisation 3D comme VRML (Huang et al, 2001; Jiang et al. 2003) ou par combinaison de plusieurs formats: VRML, X3D et KML (Knapp et al, 2007). Dans ce même contexte, P3DM (*Participatory 3D Modelling*) est une méthode collaborative basée sur le mariage entre les méthodes d'apprentissage participatif et les technologies SIG et GPS pour faire une construction de la connaissance spatiale communautaire sous forme de cartes 2D et 3D utilisées comme des supports interactifs de discussion et d'échange et de prise de décision communautaire (Rambaldi et Callosa-Tarr, 2002).

Elwood (2006) considère que les SIG participatifs sont introduits pour améliorer l'accès aux SIG traditionnels et aux données spatiales numériques et diversifier les formes de connaissance et de logique spatiale qui peuvent être incorporées dans un SIG. Les SIG participatifs ajoutent aux capacités des SIG, des outils spécifiques pour supporter la prise de décision collective (Jankowski et Nyerges, 2001) et sortir des carcans professionnels et décisionnels pour toucher plus facilement le grand public (Mericskay et Roche, 2010) et à valoriser la dimension sociale du problème plutôt que sa dimension technologique, en mettant l'accent sur la participation communautaire à la production et à l'utilisation de l'information géographique (Dunn, 2007). Orban-Ferauge (2011) soulève un autre aspect sur les SIG participatifs: «*Les chercheurs se classent selon ce qu'ils placent dans leurs priorités autour du SIG participatif: l'approche pratique du SIG au service de la participation (sigP), le développement de l'outil à des fins de participation (SIGp) ou dans la mise en œuvre de cet outil (SIGP)*».

En plus du SIG participatif, la littérature utilise un autre concept, celui des SIG collaboratifs. Une des premières approches collaboratives basées sur la technologie SIG pour une prise de décision spatiale est le système *Strabo* développé par Luscombe et Poiker (1983) (Faber et al, 1995) qui utilise la méthode Delphi et se base sur un réseau d'experts travaillant ensemble en utilisant les technologies SIG et un processus de communication structuré pour cartographier leurs visions et les étudier dans un processus itératif avant d'aboutir à un consensus autour d'une vision commune (Balram et Dragicevic, 2006). Le SIG collaboratif permet la capture, la gestion et la visualisation de la donnée spatiale et de la connaissance à la recherche de solutions et d'un apprentissage collectif (Balram et Dragicevic, 2005) au sein d'un réseau de hardware, de software et de groupes d'intérêt travaillant à l'exploration et l'analyse d'un problème (Armstrong, 1994). Le fondement autour du SIG collaboratif trouve ses racines dans la théorie de communication qui se base sur l'utilisation de la communication et l'argumentation comme des procédures formelles pour l'élaboration des idées et l'aboutissement à un consensus sur les décisions à prendre (Balram et Dragicevic, 2005). Le SIG collaboratif favorise les interactions en temps réel, l'apprentissage social et la sensibilisation sur les défis communs qui nécessitent le recours à des solutions communes (Roche et Humeau, 1999)

Une des investigations les plus importantes sur les SIG collaboratifs est celle de Balram et Dragicevic (2006) qui définissent le SIG collaboratif comme «*une intégration éclectique de théories, outils et technologies se concentrant sur, mais sans se limiter, à la structuration de la participation de l'homme dans les processus de décision spatiale de groupe*» (Balram et Dragicevic, 2006) (traduction libre). Les auteurs placent le SIG collaboratif au sein d'une architecture mettant en relation les différents concepts étroitement liés comme: PPGIS (*Public Participation GIS*), PGIS (*Participatory GIS*), GSDSS (*Group Spatial Decision Support Systems*), CGIS (*Collaborative GIS*), etc. (Fig2.8)

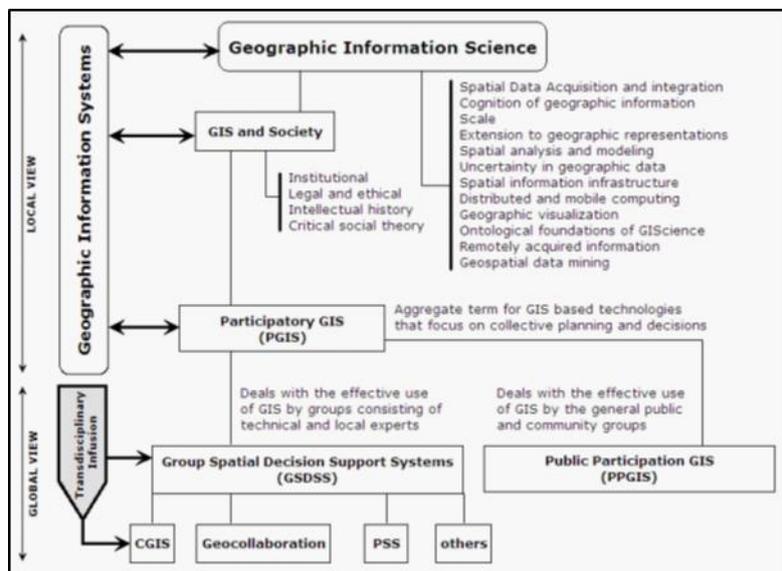


Fig2. 8. Structure hiérarchique du domaine de la recherche comportant le SIG collaboratif (Balram et Dragicevic, 2006)

Les auteurs considèrent que les SIG participatifs représentent un contexte général regroupant deux variantes qui sont les GSDSS (qui visent des groupes réduits) et les PPGIS (avec des groupes plus larges). Les SIG collaboratifs sont placés sur le même rang que la géocollaboration et les PSS (*Planning Support Systems*) et sont considérés comme des

implémentations des GSDSS. Dans le même sens, Pirotti et al (2011) considèrent le SIG collaboratif comme un sous ensemble des SIG participatifs. Selon les mêmes auteurs, l'approche participative s'avère utile dans les processus de gestion des problèmes à dimension spatiale, alors que dans une approche collaborative, l'interaction est limitée et la participation focalise sur la maintenance de la consistance des données et leur mise à jour (Pirotti et al, 2011).

Il s'avère à travers les définitions précédentes que le SIG collaboratif représente une architecture nouvelle dans laquelle l'utilisation du SIG traditionnel est étendu pour prendre en charge les interactions entre plusieurs acteurs dans un environnement de négociation et d'apprentissage collectif, à la recherche d'un consensus à propos de la décision à prendre pour la résolution d'un problème à dimension spatiale. A la différence du SIG participatif qui met le SIG à la disposition d'un public plus large, le SIG collaboratif, comme la géocollaboration, vise un public d'experts impliqué dans un système de prise de décision spatiale.

Dans les contributions énoncées ci-avant, le "collaboratif" associé au SIG concerne l'approche de travail dans laquelle le SIG est un outil de collaboration. D'autres auteurs abordent une autre question, celle des solutions à mettre en œuvre pour doter les SIG d'un potentiel collaboratif. Dans ce contexte, Pornon (2007) considère que l'enjeu à venir autour des SIG est de les rendre plus collaboratifs, à la fois dans les organisations et entre organisations. Il préconise des solutions pour aller vers des SIG collaboratifs comme: la mise en place de serveurs fédérateurs pour les données de l'organisation, les infrastructures de données spatiales, les ontologies, l'utilisation des normes et standards, etc. D'autre part, le recours à de nouveaux modes de production (co-production) (Noucher, 2009b) ainsi que la mise en place de formes collaboratives comme les communautés de pratique (CDP) (Pornon et Noucher, 2007) est un carburant pour doter les SIG d'un potentiel collaboratif. Joliveau (2004) soulève une autre question qui nous paraît fondamentale: celle de la nécessité de revoir les méthodes de conception des SIG pour les rendre plus adaptés à la planification territoriale participative.

2.4.5 Le SIG collaboratif : notre propre vision

L'exploration de la littérature sur les SIG participatifs et collaboratifs nous permet de faire les constats suivants:

- Les contributions considèrent le SIG comme une infrastructure technique utilisée avec d'autres outils pour la participation et la prise de décision collective sur le territoire que ce soit à l'échelle d'un groupe d'experts ou au sein d'un groupe plus large impliquant un public non professionnel.
- Le SIG sous ses deux appellations : participatif ou collaboratif est un outil de collaboration.
- La question conceptuelle autour du SIG collaboratif est marginalisée ou timidement soulevée par certains auteurs (comme Joliveau, 2004)

Notre propre vision s'appuie sur l'idée de mettre la collaboration au service des SIG. En effet, les fonctions classiques d'un SIG intra organisationnel ne peuvent pas être extrapolées à tout contexte d'échange, c'est tout le processus de sa mise en place conceptuelle et méthodologique qui doit être revu dans un contexte collaboratif. La collaboration ne doit pas

être vue comme une finalité mais comme un processus offrant une solution aux principaux problèmes et défis qui s'imposent pour les SIG intra-organisationnels existants. Par SIG collaboratif, nous nous entendons une solution collaborative de conception et de mise en place d'un SIG qui fait appel à la collaboration dans toute la démarche méthodologique, de la conception à la mise en œuvre. Dans cette situation, la collaboration est sollicitée pour confronter des visions différentes et construire une vision commune qui profitera aux différents acteurs par le partage des coûts d'acquisition et de mise à jour des données géographiques, des ressources et du savoir-faire. La conception collaborative revêt un intérêt majeur dans le sens où elle permet de maîtriser les divergences autour de l'information géographique qui naissent d'initiatives individuelles et de visions parfois contradictoires (Hajji et Billen, 2012). Les acteurs qui interviennent sur la même étendue géographique, qui produisent les mêmes types de données et qui ont des champs thématiques très proches ont intérêt à unifier leur vision autour d'une solution SIG collaborative, dans laquelle la collaboration se situe en amont et concerne tout le processus de mise en œuvre du SIG, depuis la conception jusqu'à réalisation. Ainsi conçu, le SIG collaboratif deviendra un outil collaboratif potentiel dans la prise de décision spatiale au sein d'un groupe d'experts.

Notre vision sur le concept de SIG collaboratif ouvre de nouvelles perspectives. Mais sa mise en œuvre et son appropriation collective pose un défi conceptuel et méthodologique. En plus de l'aspect conceptuel, le SIG collaboratif est une approche qui intègre une dimension technique aussi bien qu'une dimension collaborative. La question technique regroupe tous les processus autour du reengineering des données, de leur intégration dans l'architecture du nouveau système. L'une des principales difficultés reste de modéliser et structurer l'information dans un système cohérent pour pouvoir la partager, l'exploiter et la valoriser. Aussi, il faut savoir comment rapatrier les solutions existantes provenant des différents partenaires dans le nouveau système. La dimension collaborative nécessite des techniques d'organisation de la dynamique de groupe et d'aide au travail de conception collaborative.

Nous précisons que les aspects caractérisant une approche SIG 3D collaborative seront détaillés dans les prochains chapitres.

2.5 Conclusion

Le monde des SIG est passé de préoccupations très techniques liées aux outils et aux données à des préoccupations d'ordre cognitif et collaboratif, centrées sur l'usage des SIG et sur leur contribution à la compréhension du territoire et à l'amélioration de la transversalité dans les organisations. Le SIG «Mille-feuille» est loin d'apporter une vision intégrée pour la gestion du territoire. En plus des problèmes de discordances d'ordre technique, d'autres problèmes d'incompréhension sémantique entre plusieurs cultures et intelligences métier au sein d'un même territoire posent un problème majeur. L'utilisateur se trouve incompetent pour interpréter des données sortant de son champ thématique. Dans cette situation, le SIG est sollicité non pas pour unifier et faire dissoudre les différentes visions thématiques mais plutôt les confronter pour construire une vision partagée inter thématique. Les SIG doivent aider les organisations à travailler ensemble et converger vers une vision commune sur les décisions à prendre dans un contexte spatial.

Dans ce chapitre, nous avons fait un tour d'horizon sur les principaux concepts qui intègrent une dimension collaborative dans le champ de la géomatique : les infrastructures de données spatiales, les communautés de pratiques, la Géocollaboration, les SIG participatifs et collaboratifs qui, par la différence de leurs définitions et leur organisation, apportent chacun un potentiel collaboratif autour de l'information géographique. Si les infrastructures de données spatiales balisent le chemin de la collaboration par la mise à disponibilité et la diffusion des données, les communautés de pratique construisent des réseaux métiers qui travaillent conjointement sur des problèmes communs. La géocollaboration et les SIG participatifs fournissent une infrastructure technologique adéquate pour la négociation et l'apprentissage collectif autour de l'information géographique. Le concept de SIG collaboratif est abordé dans la littérature comme une variante des SIG participatifs s'appliquant dans un cadre de participation qui cible un groupe de professionnels dans un contexte de prise de décision spatiale.

Au concept de SIG collaboratif, nous avons attribué une nouvelle vision qui nous paraît très prometteuse. Elle concerne l'approche collaborative dans la conception d'un tel système qui dépasse sa réduction à un simple outil de collaboration. Dans le cadre de cette recherche, nous avons choisi d'aborder cette question, particulièrement autour des SIG 3D, un choix qui s'appuie sur plusieurs motivations que nous proposons de présenter dans le chapitre suivant.

CHAPITRE3. LE SIG 3D COLLABORATIF: ENJEUX ET PERSPECTIVES

3.1 Introduction

La collaboration est une pratique dont le champ d'application est très étendu vu qu'elle peut s'insérer dans plusieurs contextes pour répondre à un objectif commun. Dans la littérature, la relation entre le SIG et la collaboration est souvent encapsulée dans un cadre où le SIG est un outil pour le travail collaboratif. La plupart des développements s'inscrit dans cette logique et s'oriente vers la conception et la mise en place d'architectures technologiques collaboratives intégrant le SIG pour la représentation et la visualisation des scénarios de prise de décision. Ainsi vu, le SIG se réduit à un outil collaboratif.

Nous avons proposé une autre vision autour du SIG collaboratif dans laquelle la collaboration est sollicitée pour une conception coopérative du système. Notre vision trouve motivation dans plusieurs enjeux qui se résument dans l'apport du SIG collaboratif dans la maîtrise de plusieurs questions conceptuelles et techniques autour de l'interopérabilité des données spatiales. D'autres sources de motivations ont permis d'orienter nos investigations dans le contexte des SIG 3D. L'objectif de cette partie est de présenter les enjeux autour d'une solution SIG 3D collaborative en mettant l'accent sur les potentialités des SIG collaboratifs dans le contexte de la 3D. Autour de cette solution, nous présentons les questions conceptuelles et techniques ainsi que les contraintes de mise en œuvre.

3.2 Le SIG 3D collaboratif: Une solution à enjeux multiples

Les progrès réalisés en matière d'acquisition des données 3D, de reconstruction et de modélisation 3D imposent aux futurs SIG d'être capables d'exploiter pleinement les potentialités de ces données. Il est aujourd'hui admis que le SIG 3D est une solution prometteuse qui s'affranchit des limites des SIG 2D/2.5D en offrant un système adapté pour la gestion optimale de la troisième dimension.

Du côté des organismes producteurs et gestionnaires potentiels des données de référence, la question des SIG 3D pose un grand défi. La première contrainte est d'ordre technique et conceptuel. En effet, malgré l'évolution marquante que connaît le sujet de la 3D, la question technique n'est pas totalement maîtrisée. Il n'y a pas de solution 3D universelle et les SIG "3D" commerciaux sont loin d'offrir des solutions complètes. Ainsi, toutes les composantes techniques d'un système 3D doivent être étudiées dans un cadre conceptuel pour aboutir à des choix qui s'adaptent aux contextes d'une application. La diversité des solutions technologiques requiert également une étude de Benchmark pour choisir les outils les mieux adaptés. Une autre question concerne les besoins 3D qui ne sont pas clairement définis. En effet, l'utilisateur peut facilement juger si une donnée 3D répond à ses besoins, mais il est incapable d'anticiper ses exigences en termes de spécifications requises pour une donnée 3D (Sargent et al 2007). Le problème de la méconnaissance des besoins en 3D qui a été soulevé par Fuchs et al (1998), Billen (2000) et Zlatanova (2000b) fait encore débat. Notamment, dans le dernier workshop sur le standard CityGML qui a eu lieu à Paris en

janvier 2013, nous avons conclu que la question des besoins 3D entrave les agences nationales dans le choix des systèmes 3D à concevoir.

Les développements autour de la 3D sont essentiellement basés technologie («Par ce qu'il est techniquement possible»), sans trop se tarder sur la définition des besoins qui doit se situer en amont du projet 3D. Du point de vue conception de SIG, les méthodes traditionnelles se trouvent biaisées face aux changements qu'a connus le domaine de l'information spatiale. Leur adaptation aux nouveaux besoins est une nécessité. Le coût constitue également une contrainte majeure pour beaucoup d'organismes ayant des ressources limitées. La production de données 3D de qualité à l'échelle d'un territoire, leur maintenance et leur mise à jour requièrent des ressources importantes qui dépassent les budgets. Un autre défi important à considérer est celui de la multiplication des actions autour de l'information géographique qui oblige les organismes à produire des données interopérables. Dans le contexte actuel, Il nous paraît une grande erreur de limiter les développements 3D dans un cadre intra organisationnel dans lequel la donnée 3D serait ancrée dans une certaine culture métier alors qu'elle est censée être un objet de collaboration s'adaptant à plusieurs contextes.

En résumé, le SIG 3D pose des contraintes à la fois conceptuelles, techniques et organisationnelles qui handicapent sa mise en œuvre. Il doit aussi s'insérer dans un contexte où les partenariats et la collaboration s'imposent à plusieurs échelons du territoire. Pour répondre à ces défis, le SIG 3D collaboratif nous paraît une solution prometteuse. Les motivations en sont multiples. Nous les résumons dans les points suivants:

- Les données 3D sont aujourd'hui un besoin accru pour la gestion de l'espace mais le coût de leur acquisition, leur mise à jour et leur échange en limitent l'appropriation et le bon usage. Deux perspectives sont importantes autour des SIG 3D collaboratifs: 1) la fusion des connaissances réparties entre plusieurs bases de données pour produire une donnée 3D de référence et 2) la coproduction d'un fond de plan 3D selon des spécifications communes en vue de partager les coûts, d'une part et d'assurer une interopérabilité technique et sémantique, d'autre part.
- Les modèles 3D ne sont pas encore arrivés à maturité pour un bon nombre d'organismes qui se situent à des stades préliminaires au niveau de l'appropriation de la 3D. La collaboration autour d'un SIG 3D poserait moins d'impacts sur les solutions existantes.
- Un modèle 3D doit être vu comme une base pour l'intégration de la connaissance urbaine (Falquet et Métral, 2005), ce qui démontre l'utilité de la collaboration dans sa conception.
- Des formes de partenariat se multiplient à plusieurs échelles mais ne sont pas assez formalisées et leur apport est souvent limité par rapport aux attentes. A travers un SIG 3D collaboratif, la collaboration se situerait en amont et permettrait d'instaurer une culture coopérative et mettre les enjeux de la collaboration au profit du développement avant l'utilisation.
- L'expérience a démontré que les SIG classiques sont greffés dans des contextes intra organisationnels et leur usage en dehors de leur contexte pose des problèmes sémantiques et techniques. Les SIG 3D collaboratifs permettraient de doter les SIG 3D d'un potentiel inter organisationnel et collaboratif pour supporter les projets de prise de décision collaborative.

Les SIG 3D collaboratifs se veulent ainsi comme solution potentielle qui permet de maîtriser le maximum de défis qui se posent aux SIG 3D en tendant vers une solution de conception et de réalisation collaborative.

3.3 Le SIG 3D collaboratif: un système multidimensionnel

Le SIG 3D collaboratif est considéré comme un système multidimensionnel qui imbrique plusieurs composantes interdépendantes qui doivent être analysées et étudiées dans un contexte global: une composante collaborative, une composante technique et une composante conceptuelle (*Fig3.1*). Certes, il est difficile de cerner les limites entre ces trois dimensions vu leur insertion dans une architecture intégrée, mais nous tentons de les analyser séparément pour mettre en relief le caractère multidimensionnel du SIG 3D collaboratif.

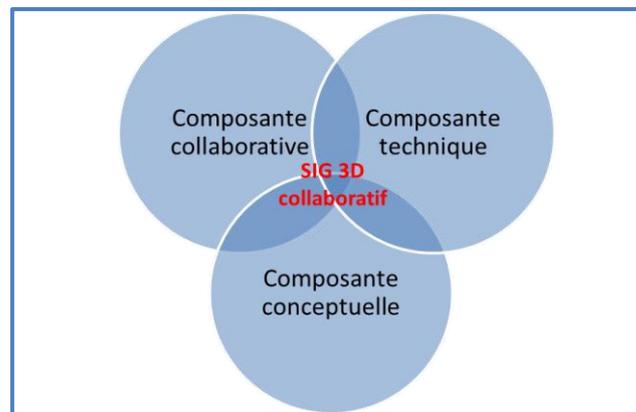


Fig3. 1. Composantes d'un SIG 3D collaboratif

3.3.1 La composante collaborative

Tel que nous l'avons défini, le SIG 3D collaboratif se développe dans un contexte collaboratif qui impose des méthodes particulières par rapport aux SIG classiques. La collaboration s'impose au démarrage du projet et porte sur les différentes phases de définition, d'analyse, de réalisation et d'évaluation. Nous reprenons dans ce cadre la définition proposée par Serge K. Levan qui décrit la collaboration comme un processus cyclique articulé autour de quatre phases: la co-analyse (diagnostic pour se construire un référentiel cognitif); la co-définition (d'une stratégie qui permet de partager une vision sur le résultat à atteindre et la démarche à mettre en œuvre); la co-réalisation (des actions et suivis de l'avancement du travail collaboratif); et la co-évaluation (des résultats intermédiaires et le pilotage du processus collaboratif) (Roche, 2009). Nous adoptons cette définition comme approche fondamentale sur base de laquelle se développe un SIG 3D collaboratif et qui s'appuie sur le principe que l'action collaborative est présente dans toutes les étapes de la réalisation du projet, depuis la conception et l'analyse jusqu'à l'évaluation (*Fig3.2*), à travers un exercice de communication et de négociation entre les partenaires pour arrêter des choix conceptuels et techniques.

La dimension collaborative soulève une question fondamentale, celle de la démarche à adopter pour l'instauration de l'action collaborative. Autrement dit, la collaboration doit s'installer dans les cultures organisationnelles selon une démarche réfléchie qui offre une certaine assurance de faisabilité avant qu'un projet SIG 3D ne soit entamé. Dans le contexte

des partenariats autour des SIG, Pornon (1998) identifie deux types de parcours: le premier parcours est celui qui consiste à mettre au point une structure de partenariat pour formaliser les relations et par la suite la faire fonctionner concrètement au niveau des individus. Le second parcours consiste à démarrer de façon très peu formalisée au niveau des individus: discussions entre participants, exploration des partenariats possibles, tentative de mettre en place une première situation concrète de partenariat qui peut évoluer dans le temps, etc.

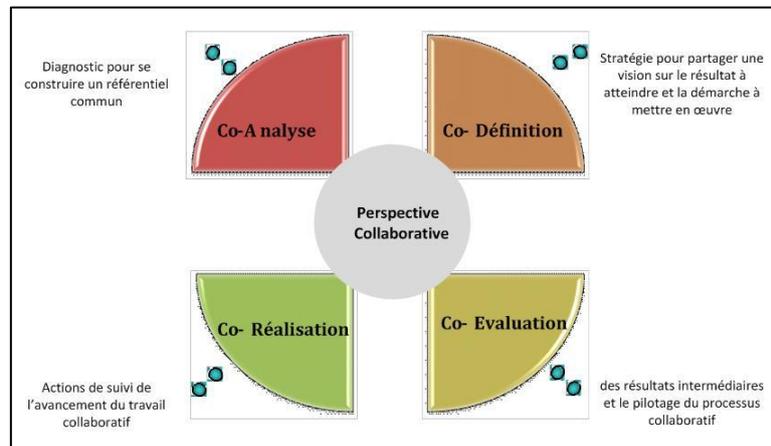


Fig3. 2. La dimension collaborative du projet

Certes, la formalisation des partenariats comme action préalable à la collaboration permettrait de mieux cerner les responsabilités et les attributions de chaque acteur dans un cadre légal. Cependant, cette solution présente, à notre avis, un grand risque d'échec. En effet, la collaboration est souvent freinée par la volonté de sauvegarder les intérêts individuels et les partenaires doivent pouvoir percevoir l'intérêt d'y participer. La mise en place de situations concrètes de partenariat est un bon catalyseur pour une future collaboration. Selon Pornon (1998) : «*Les démarches progressives, franchissant les étapes les unes après les autres, aboutissent plus rapidement à des réalisations plus convaincantes que les démarches "volontaristes" ou "autoritaires"*». Pornon (1998) considère que les outils génèrent de nouveaux besoins et font évoluer les formes de partenariat vers la collaboration et aident au franchissement des seuils de formalisation et de "humanware" qui doivent évoluer conjointement.

En résumé, la collaboration est loin d'être une décision ponctuelle statique mais elle représente un processus dynamique et évolutif (Hajji et Billen, 2012). Nous reprenons la figure 3.3 pour illustrer ces propos. La composante collaborative doit s'imposer au début du projet pour mettre les briques essentielles d'organisation du travail collaboratif sans toutefois imposer un cadre légal très contraignant qui peut handicaper la conduite du projet.

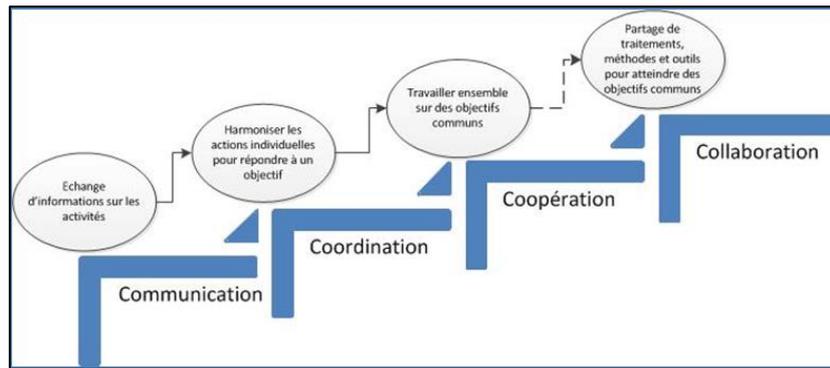


Fig3. 3. La collaboration est un processus évolutif

3.3.2 La composante conceptuelle

La conception est une activité complexe nécessitant l'intégration de multiples points de vue (cognitif, technique, social, économique, organisationnel, etc.) (Belkadi et al, 2004). La dimension collaborative du projet rend la tâche de conception plus ardue vu que les connaissances sont distribuées, hétérogènes et parfois incomplètes.

Les méthodes classiques de conception d'applications géomatiques répondent à la question sur les objectifs à atteindre en énumérant les étapes nécessaires pour l'accomplissement de ces objectifs. Dans le cadre du SIG 3D collaboratif, la conception est un processus collaboratif qui évolue dans un cadre de négociation et de concertation entre les partenaires. Les étapes conceptuelles ne sont pas cernées au début du projet mais sont explorées et définies dans un cadre collaboratif. Une étape de définition du problème est ainsi requise pour explorer les scénarios à entreprendre. En outre, dans un projet de conception d'un SIG classique, les solutions conceptuelles sont guidées par les objectifs définis par une organisation cible, ce qui n'est pas le cas dans le cadre d'un SIG 3D collaboratif où la conception collaborative cible une organisation «abstraite» qui représente toutes les organisations partenaires. Les solutions conceptuelles doivent se détacher de toutes les spécificités individuelles mais leur injection dans chaque organisation nécessite un exercice de reengineering adapté à chaque contexte et qui doit faire partie intégrante du projet. Le travail de conception doit s'appuyer sur une méthode, définir un référentiel géographique commun pour les données 3D et utiliser des outils géomatiques ainsi que des outils d'aide au travail collaboratif (Fig3.4).

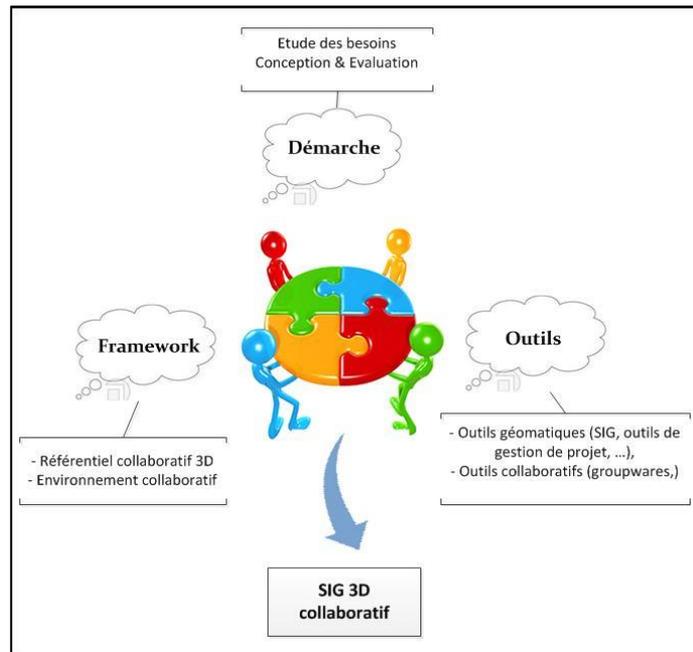


Fig3. 4. Dimension conceptuelle du projet

3.3.3 La composante technique

La question technique constitue une part importante du SIG 3D collaboratif. Les données 3D doivent être standardisées pour être interopérables. Normalement, les solutions conceptuelles doivent se détacher de toute considération technique, mais avec les besoins en termes d'interopérabilité, certains choix techniques peuvent s'imposer au début du projet pour piloter les processus conceptuels. A titre d'exemple, le choix d'un standard comme CityGML pour les données 3D influencerait les solutions conceptuelles et aussi l'étude technique pour choisir les outils qui soient compatibles avec ce standard. Aussi, la particularité du SIG 3D vient du fait que la solution adoptée sera intégrée dans des organisations qui disposent déjà de modèles 2D/2.5D ou 3D. La première version d'implantation du SIG 3D est construite par intégration des données existantes au niveau de chaque organisation. Il en résulte que la composante technique est beaucoup plus consistante que dans les projets SIG intra organisationnels. Elle porte sur trois étapes fondamentales: 1) la modélisation et la conception; 2) le reengineering et l'intégration des données 3) la mise en place et l'appropriation collective du système (*Fig3.5*).

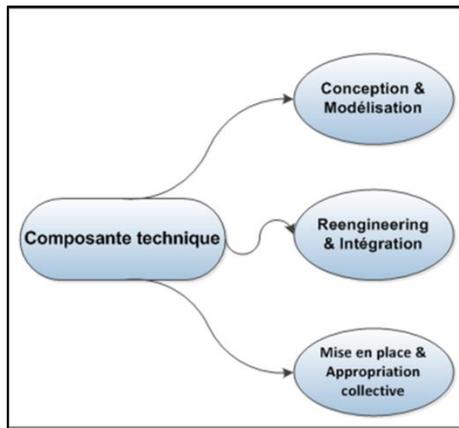


Fig3. 5. Composante technique du projet

3.4 Architecture générale d'un SIG 3D collaboratif

L'architecture générale du SIG 3D collaboratif (*Fig3.6*) repose sur trois étapes principales: la modélisation de la base de données collaborative, le développement de l'interface SIG 3D et l'intégration des données dans le SIG.

La modélisation de la base de données est exécutée à travers les trois étapes classiques: modélisation conceptuelle, modélisation logique et modélisation physique. La modélisation conceptuelle concerne l'aspect géométrique, topologique et attributaire. La modélisation géométrique 3D est une étape importante qui conditionne la robustesse du modèle et la performance du système. Elle nécessite une réflexion sur les structures à adopter vu que la géométrie des objets 3D n'est pas aussi simple à décrire qu'en 2D et que la multiplicité des choix sur les modèles 3D ajoute un degré de complexité au problème. Le modèle géométrique doit être complété par un modèle topologique 3D pour accomplir des requêtes d'analyse spatiale 3D sans toutefois engendrer des difficultés de maintenance et des lourdeurs de calcul. Les spécifications attributaires du modèle 3D doivent privilégier les attributs reconnus pertinents pour le modèle de référence. Les différents besoins doivent être réconciliés pour définir des spécifications standards pour la donnée 3D que les acteurs peuvent compléter en fonction de leur propre besoin.

Concernant la structure de la base de données 3D collaborative, plusieurs critères peuvent être considérés pour le choix d'un SGBD dont les plus importants sont : la prise en charge des structures 3D, la compatibilité avec les standards, le niveau d'usage, la performance et le coût. Le SIG 3D doit offrir une interface graphique permettant une visualisation réaliste des modèles à travers des propriétés physiques des objets (couleur, texture, ombrage, etc.). Il doit fournir des opérateurs métriques (calcul de distances, surfaces, volumes, etc.) et topologiques 3D (proximité, adjacence, inclusion, etc.) pour la manipulation des modèles.

Si l'étape de modélisation s'apparente en général aux méthodes classiques de conception de SIG en les appliquant à un contexte 3D, l'intégration des données revêt une grande complexité due à la différence dans les sources et le besoin de reengineering des données et de traduction des schémas pour répondre aux spécifications du modèle collaboratif.

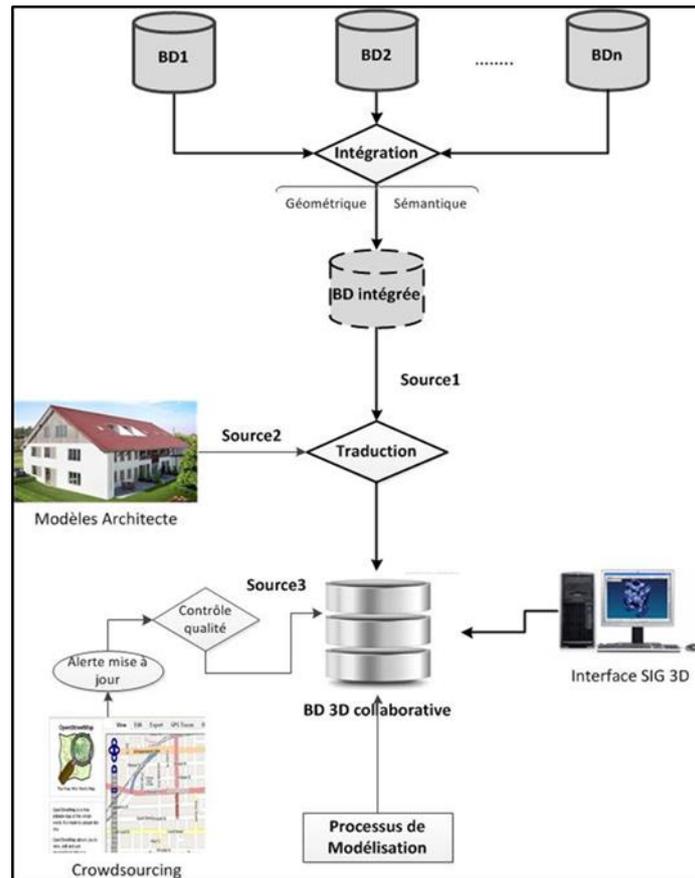


Fig3. 6. Architecture générale d'un SIG 3D collaboratif

Le SIG 3D s'intègre dans un environnement complexe comportant des données, des modèles ou des systèmes existants de dimensions différentes: 2D, 2.5D ou 3D. L'ensemble constitue des connaissances hétérogènes distribuées et de qualités différentes mais qui doivent être exploitées pour monter une première version du SIG 3D collaboratif. Les données à intégrer posent plusieurs défis conceptuels et techniques. Dans la partie suivante, nous tentons de répondre à la question: Quelles questions conceptuelles et techniques sont soulevées dans un projet SIG 3D collaboratif?

3.5 Questions conceptuelles et techniques

3.5.1 Le Design d'un modèle 3D collaboratif

Le terme Modèle est fréquemment utilisé dans plusieurs domaines. En général, le modèle est conçu en faisant une abstraction de la réalité en vue de la rendre compréhensible à un utilisateur. Spécifiquement, le modèle de données dans un SIG est utilisé pour représenter les objets référencés dans l'espace géographique. Il consiste en une structure générique pouvant être peuplée avec des instances et regroupe des classes, des attributs, des relations, des contraintes et des opérations (Stoter, 2004). Dans le cadre des applications 3D, la consistance d'un modèle 3D à vocation générale est d'autant plus difficile à spécifier que les besoins des utilisateurs sont très variés, voire mal définis, en termes de types d'objets à représenter et de leurs spécifications en précision géométrique et sémantique. Une représentation avec égalité de détails et de précision n'a aucun intérêt si on sait très bien que les niveaux de détails et de précision sont fortement liés à l'intérêt porté par tout un chacun sur les objets 3D à représenter dans le cadre d'une application spécifique. Aussi, la

question de la sémantique est source de conflits vu que l'objet géométrique qui s'insère dans un contexte spécifique est toujours porteur d'une certaine sémantique qui s'adapte à ce contexte. Alors qu'un objet 3D collaboratif de référence comme le bâtiment doit être attribué une sémantique standard se détachant des spécificités organisationnelles. L'interopérabilité du modèle 3D collaboratif doit être aussi prise en charge. Dans ce contexte, le standard CityGML fournit une nouvelle approche thématique et sémantique des modèles 3D de villes qui définit l'environnement urbain avec toutes ses composantes thématiques.

CityGML est une recommandation du projet INSPIRE. Pour l'objet bâtiment qui constitue une composante centrale de l'espace urbain, plusieurs spécifications ont été recommandées dans le cadre d'INSPIRE, elles sont référencées dans le document INSPIRE D2.8.III.2 Data Specification on Buildings – Draft Guidelines (version du 04/02/2013). Dans la directive INSPIRE, le thème "Bâtiment" fait partie des données de référence qui sont requises dans l'infrastructure spatiale des données. Le modèle de données est basé sur une approche flexible qui autorise des représentations multiples pour les bâtiments à travers quatre profils avec des niveaux de détail géométriques et sémantiques différents:

- Les profils "Core" reprennent les requis nécessaires à implémenter: Le profil "Buildings2D" inclut des représentations géométriques des bâtiments en tant que données 2D ou 2.5D alors que le profil "Buildings3D", de même contenu sémantique que le profil "Buildings2D", permet la représentation géométrique des bâtiments selon les quatre niveaux de détail du CityGML.
- Les profils étendus ajoutent des informations détaillées sur le thème "Bâtiment" : Le profil "BuildingsExtended2D" est une extension sémantique du profil "Buildings2D" avec des attributs thématiques supplémentaires (matériel de construction, espace officiel ou autre, etc.). Le profil "BuildingsExtended3D" est une extension du profil "Buildings3D" pour des représentations 3D plus riches à différents niveaux de détails. Il inclut la possibilité de représenter d'autres composants de bâtiment comme les ouvertures, les intérieurs (pièces, installations intérieures) et des textures associées.

Pour la question spécifique de la 3D, le schéma d'application "Buildings3D" définit la géométrie des "Buildings" et "Building Part" à travers une représentation 3D basée sur les niveaux de détail du CityGML et une possibilité d'inclure une représentation 2D/2.5D via l'attribut "Geometry2D" dont la cardinalité est de [0..*] (Fig3.7). Plusieurs solutions sont envisagées pour la représentation des bâtiments en 3D selon les quatre niveaux de détail du CityGML:

- choisir un Lod pour l'ensemble des bâtiments d'un jeu de données
- choisir des Lod différents au sein du même jeu de données (certains bâtiments en Lod1, d'autres en Lod2, Lod3 ou Lod4)
- faire des représentations multiples, dans le même jeu de données, pour le même bâtiment.

Généralement, des bâtiments ordinaires sont représentés en Lod1 ou Lod2 tandis que les bâtiments remarquables sont représentés avec plus de détails (Lod3 ou Lod4). Le schéma d'application "Buildings3D" impose à ce que au moins une des géométries (Lod1, 2, 3 ou 4 représentée en solide ou multi surface) soit fournie via la contrainte «MandatoryGeometry».

Dans le cas de l'intégration des bases de données géographiques, les méthodes déclaratives sont les plus adaptées (Devogele, 1997). Elles distinguent les deux problèmes suivants:

- La déclaration des correspondances: à travers l'identification des éléments des bases qui représentent les mêmes phénomènes du monde réel. Ces déclarations sont exprimées indépendamment de la façon dont les schémas seront ensuite intégrés.
- L'intégration: la conception d'une structure précise permettant de représenter les instances de l'ensemble des bases d'origine. Cette seconde étape nécessite de se fixer une stratégie en fonction de l'objectif de l'intégration.

L'intégration des données (et des schémas) est une étape fondamentale dans le processus d'intégration des bases de données (Fig3.8). Elle consiste à définir les stratégies d'intégration à adopter pour la résolution des conflits. Le choix de la stratégie dépend des bases de données à intégrer et des besoins auxquels la base de données intégrée doit répondre (Olteanu, 2008). Dans la littérature, deux stratégies sont identifiées: une stratégie multi-représentations où les différentes représentations du monde réel sont préservées et les éléments homologues (schémas et données) sont reliés entre eux et une stratégie mono-représentation qui consiste à fusionner les informations et à éliminer les redondances (Devogele, 1997). La stratégie mono-représentation est aussi désignée par le concept de conflation (Yuan et Tao, 1999).

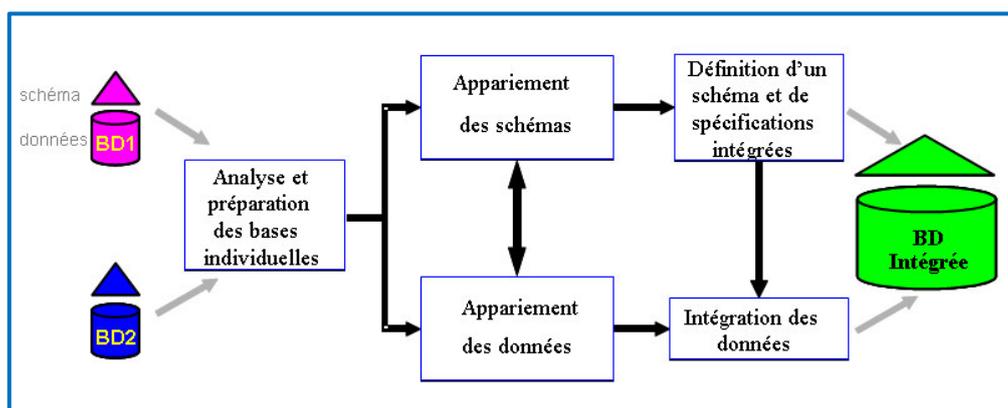


Fig3. 8. Processus d'intégration des bases de données géographiques (Olteanu, 2008)

Les entités géographiques sont attribuées une localisation spatiale et sont intrinsèquement liées à cette localisation qui conditionne la plupart de leurs propriétés physiques, qu'elles soient géométriques, topologiques ou méréologiques (Olteanu, 2008). Les représentations multiples des données engendrent des incohérences au niveau géométrique et sémantique. Au niveau des bases de données, l'hétérogénéité peut être de nature sémantique (essentiellement due à des classifications et des choix terminologiques différents pour un même type d'entités géographiques) ou schématique (en plus des divergences de catégorisation, la structuration de l'information selon des schémas conceptuels différents ajoute un problème d'hétérogénéité schématique (Bishr, 1998)). Les spécifications des bases de données constituent également une source d'hétérogénéité. Elles attribuent une certaine granularité à une base de données à travers un ensemble de règles régissant leur contenu. Les spécifications sont généralement renseignées dans des catalogues et font partie intégrante des métadonnées associées à la base. Le niveau de détail associé à une base de données géographique conditionne son contenu en termes de sélection des

concepts à représenter, leur modélisation et leur représentation géométrique. En plus des hétérogénéités mentionnées, les bases de données géographiques comportent des imperfections. En effet, les trois aspects qui caractérisent les données géographiques, c'est-à-dire la localisation, l'information attributive et les relations spatiales sont soumis à des imperfections (Hwang et al, 1998 ; Duckham et Sharp, 2005). La notion d'imperfection dans les connaissances fait appel à trois concepts: l'imprécision, l'incertitude et l'incomplétude (Masson, 2005) qui relèvent du domaine de l'intelligence artificielle.

En résumé, l'intégration des données provenant de plusieurs bases s'affronte à des problèmes d'incohérences désignés par conflits d'intégration qu'il faut pouvoir identifier afin de les signaler lors de la déclaration des correspondances (Devogele, 1997). Une taxonomie des différents conflits d'intégration des bases de données géographiques a été établie par Devogele (1997) (Fig3.9).

- **conflits de sources de données**
- **conflits d'hétérogénéité**
 - conflits de modèle
 - conflits de type de positionnement
 - conflits de gestion de la troisième dimension : la hauteur
 - conflits de modélisation de la troisième dimension
 - conflits d'abstraction de la troisième dimension
 - conflits de mode de représentation de la géométrie
 - conflits de méta-données géométriques
 - conflits de modélisation de la topologie
- **conflits de définition des classes**
 - conflits de classification
 - conflits de regroupements
 - conflits de résolution
 - conflit de données / méta-données
 - conflits de critère de spécification
 - conflits de critères de sélection
 - conflits de critères de décomposition
 - conflits de fragmentation
 - conflits de segmentation
 - conflits de granularité
 - conflits de décomposition
- **conflits de structures**
 - conflits de structures classiques
 - conflits de stockage de l'information
- **conflits de description sémantique et géométrique**
 - conflits de description des classes
 - conflits de description simples entre les attributs
 - conflits de description n-aires entre attributs
 - conflit de description de la géométrie pour les données vecteurs
- **conflits de données**

Fig3. 9. Conflits d'intégration de bases de données géographiques (Devogele, 1997)

L'intégration des données multi sources doit faire appel à des processus d'appariement des données et de résolution des conflits par des techniques de conflation. Après l'identification des correspondances par le processus d'appariement, la conflation permet de produire à partir de plusieurs jeux de données un nouveau jeu de données avec une meilleure précision spatiale et attributive, en minimisant la redondance et en réconciliant les conflits (Longley et al, 2005). Yuan et Tao (1999) identifient deux types de conflation : la conflation verticale, c'est-à-dire la fusion de deux jeux de données qui couvrent le même territoire du monde réel, et la conflation horizontale, c'est-à-dire la conflation entre deux jeux de données adjacents (Fig3.10). Les techniques de conflation les plus utilisées dans la littérature sont reportées par (Ruiz et al, 2011). Par exemple, la technique de *Rubber-sheeting* est l'application d'un champ vectoriel continu pour déformer l'ensemble des objets.

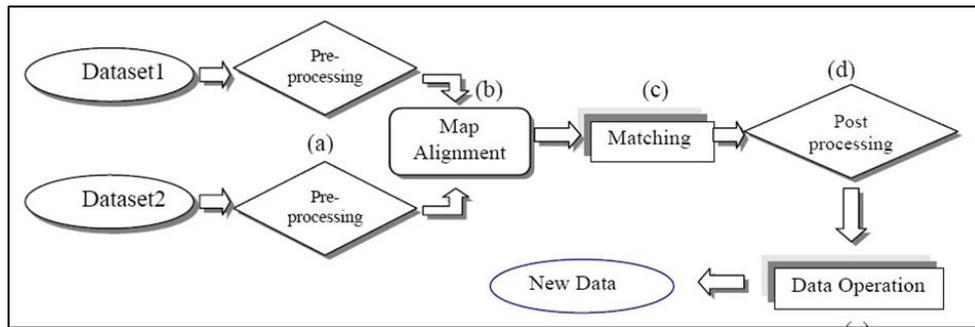


Fig3. 10. Le processus de conflation proposé par (Yuan et Tao, 1999)

3.5.3 L'appariement

L'appariement des données géographiques est le processus qui consiste à établir des liens de correspondance entre les objets géographiques représentant les mêmes phénomènes du monde réel mais provenant de jeux de données différents (Belhadj, 2001).

Lors de la mise en correspondance des bases de données, les différences de résolutions engendrent différents types de cardinalité pour les liens de correspondance:

- Liens de cardinalité [1-0] ou [0-1]: ce lien met en évidence l'absence d'homologues, éventuellement due à des omissions ou des actualités différentes entre les bases.
- Liens de cardinalité [1-1]: ce type de lien concerne la correspondance entre objets simples.
- Liens de cardinalité [1-n], [n-1] et [n-m] : dans ce cas, la correspondance n'est pas biunivoque; un objet ou un agrégat d'objets d'une base correspond à un agrégat d'objets simples de l'autre base dans un sens réciproque (*Fig3. 11*).

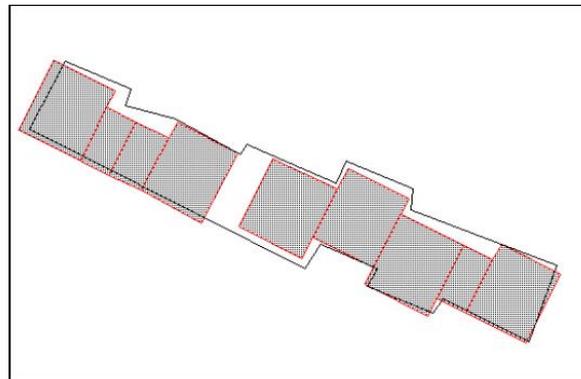


Fig3. 11. Exemple d'un cas d'appariement [1-n]

3.5.3.1 L'appariement : un outil pour répondre à plusieurs besoins

L'appariement est une technique utilisée dans de nombreuses applications manipulant les données géographiques pour répondre à plusieurs besoins: le contrôle qualité des données géographiques (Belhadj, 2001), le recalage, la mise à jour (Gomboši et al. 2003), la détection des incohérences entre les bases de données géographiques (Sheeren et al. 2004) et l'intégration (Devogele, 1997; Mustière, 2006)

L'appariement dans le cas d'un contrôle qualité sert à établir des liens de correspondance entre un jeu de données, objet de l'analyse et un jeu de données pris comme référence pour contrôle de la qualité géométrique, de la sémantique et de l'exhaustivité. L'appariement des données géographiques est également un outil pour recaler des données géographiques sur un référentiel dans le but d'améliorer leur qualité géométrique. Le recalage des données consiste à superposer deux jeux de données représentant potentiellement la même réalité sur une même zone géographique et d'identifier des points homologues par appariement, en vue de réaliser une transformation géométrique (Olteanu, 2008). Dans un contexte de mise à jour, l'appariement des données est un outil qui permet de détecter les éléments homologues entre deux actualités et d'interpréter les évolutions entre deux bases de données géographiques en utilisant la cardinalité des liens d'appariement. L'appariement est aussi un processus important pour l'intégration des bases de données géographiques. La fusion des informations provenant de différentes sources permet d'une part d'enrichir les bases de données à moindre coût et d'autre part, d'élargir leurs champs d'utilisation. Dans ce contexte, l'appariement est utilisé pour identifier les objets candidats à la fusion, qui peut prendre la forme d'un transfert de l'information sémantique d'une base sur les éléments géométriques d'une autre base, ce qui permet de combiner la richesse sémantique de la première base avec la précision géométrique de la seconde (Sheeren, 2002).

3.5.3.2 Les types d'appariement

Le processus d'appariement peut porter sur la mise en correspondance entre les schémas, connu sous le nom d'«appariement des schémas» ou entre les données, processus appelé «appariement des données» (Olteanu, 2008). Les deux processus ne sont pas complètement indépendants (Fig3.12), en principe ils interagissent entre eux (Volz, 2005).

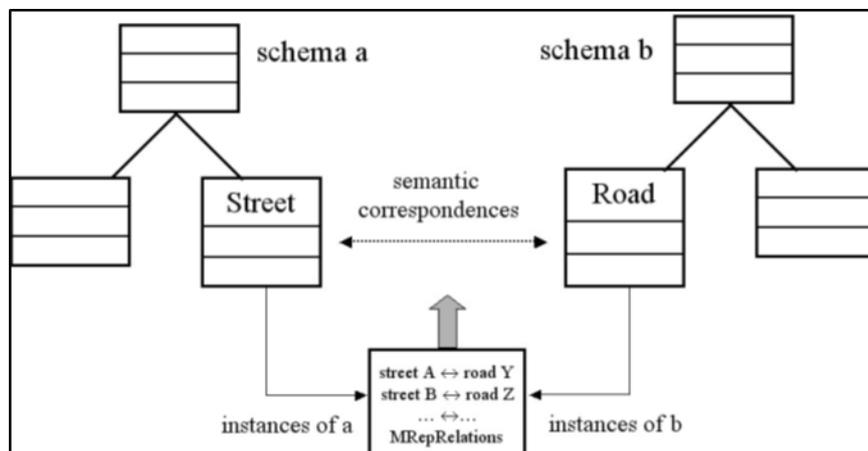


Fig3. 12. Appariement des schémas dérivé de l'appariement des données (Volz, 2005)

L'appariement des données

L'appariement des données géographiques est le processus qui consiste à établir des liens de correspondance entre des instances de bases de données représentant les mêmes phénomènes du monde réel mais provenant de jeux de données différents (Belhadj, 2001; Sheeren, 2004) (Fig3.13).

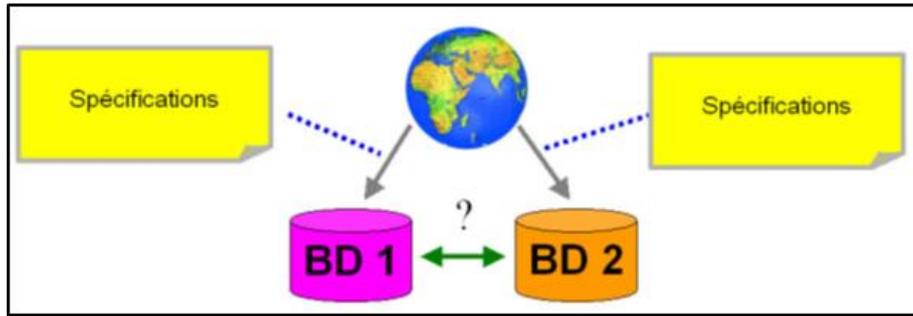


Fig3. 13. Contexte de l'appariement des données (Olteanu, 2008)

L'appariement des schémas

L'appariement des schémas fait appel à plusieurs techniques. Il y a des techniques dites simples basées sur la mise en correspondance d'informations issues directement des schémas (le nom d'une classe, les attributs, les relations de généralisation, spécialisation, etc.) (Madhavan et al. 2001; Rahm et Bernstein, 2001) et des techniques fondées sur la déclaration d'Assertions de Correspondance Inter-schémas (ACI) (Parent et al, 1996; Devogele, 1997; Sheeren et al. 2009) qui sont basées sur l'identification de toutes les correspondances entre les schémas de données à un niveau sémantique et entre leurs instances. La déclaration des ACI répond à la question suivante : Pour chaque phénomène du monde réel, quel ensemble d'éléments de la BD1 le représente et quel ensemble d'éléments de la BD2 le représente? (Devogele, 1997). Le tableau 3.1 illustre un cas de déclaration d'ACI entre deux bases de données.

BD1	BD2
classe COMMUNE : n-uplet (Num_INSEE = entier, Département = string, Région = string, Population = entier, Géométrie = surface)	classe COMMUNE_IDF : n-uplet (numéro_INSEE = entier département = string, maire = Personne, géométrie = surface)

Tab3. 1. Exemple de classes à appairer (Devogele, 1997)

La correspondance entre la classe **COMMUNE** de la BD1 qui gère l'ensemble des communes de France et la classe **COMMUNE_IDF** de la BD2 qui décrit l'ensemble des communes de la région Ile de France est représentée par l'ACI suivante :

SELECTION (Région = «Ile de France») BD1. COMMUNE ≡ BD2. COMMUNE_IDF

D'autres approches d'appariement de schémas proposent de se baser sur une ontologie de domaine (Fonseca et al. 2002; Gesbert, 2005; Mostafavi, 2006; Mustière et al. 2007; Abadie, 2012). Ces approches permettent de déduire les correspondances entre les éléments des schémas des bases de données à appairer à travers les similarités sémantiques entre ceux-ci et les éléments d'une ontologie de domaine.

3.5.3.3 Les critères d'appariement et les mesures associées

En raison de la complexité du processus d'appariement des données géographiques, il est nécessaire de s'appuyer sur l'évaluation de l'écart entre une ou plusieurs propriétés de deux objets potentiellement homologues, en se basant sur certains critères, appelés critères d'appariement (Olteanu, 2008). Ces critères sont définis sur base des caractéristiques qui

sont associées à l'objet géographique (Fig3.14) et pour lesquelles des mesures quantitatives sont définies pour évaluer la correspondance sur base d'un certain nombre de seuils. Ces critères peuvent être utilisés séparément ou conjointement en fonction des bases de données sources et de leur apport informationnel pour piloter le processus d'appariement. A titre d'exemple, l'attribut « nature géographique » d'un objet s'avère pertinent pour guider la recherche des correspondances et minimiser la cardinalité des liens entre objets potentiellement homologues.

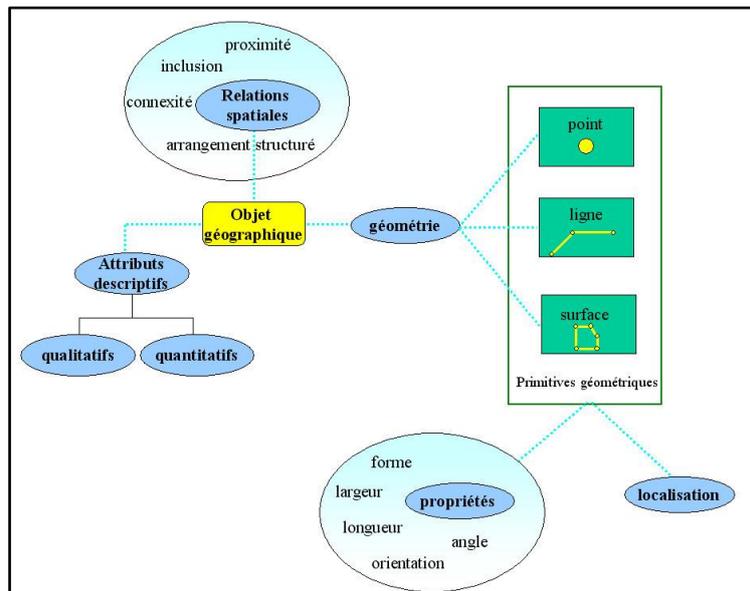


Fig3. 14. Les caractéristiques d'un objet géographique (Olteanu, 2008)

- **Le critère géométrique**

Le critère géométrique s'appuie sur la géométrie des objets en termes de localisation et d'informations implicites sur leur forme (longueur, orientation...). Dans le cas des objets surfaciques comme les bâtiments, trois types de mesures basées sur la localisation sont utilisées: la distance surfacique, la fonction à distance radiale ou la fonction angulaire (Olteanu, 2008). La distance surfacique (Fig3.15) permet de mesurer l'écart de position entre deux objets surfaciques. Elle a été initialement définie par (Vauglin, 1997) et utilisée entre autres par (Bel Hadj, 2001; Sheeren, 2005) pour apparier des objets surfaciques. Pour les autres mesures, nous renvoyons le lecteur vers (Olteanu, 2008; Belhadj, 2001).

- **Le critère topologique**

Ce critère est basé sur la comparaison des relations topologiques entre les objets qui décrivent leur position relative au moyen des relations spatiales d'inclusion, d'intersection et d'adjacence (Egenhofer, 1989; Egenhofer et Herring, 1990; Clementini et al. 1993). Ces relations ont été formalisées par le modèle des 4 intersections (4I) qui a été ensuite étendu au modèle des 9 intersections (9I).

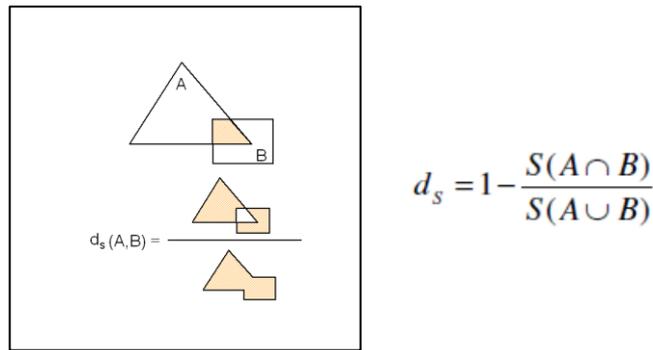


Fig3. 15. Distance surfacique entre deux objets (Olteanu, 2008)

- **Le critère attributaire/sémantique**

En se référant au critère attributaire, les objets sont appariés grâce à la valeur de leur identifiant commun. Il existe dans la littérature de nombreuses mesures qui permettent de comparer les noms d'attributs en termes de chaînes de caractères comme : la distance de Hamming, la distance de Levenshtein ou la distance d'édition. Nous trouvons dans (Euzenat et Shvaiko, 2007) une description détaillée des mesures de distance basées sur la comparaison des noms d'attributs.

En raison de la complexité de l'information géographique dans le contexte de l'intégration de bases de données, la sémantique basée sur l'analyse des concepts est une source de connaissance pertinente en l'absence d'identifiant unique, et lorsque les critères géométriques sont insuffisants. De nombreux auteurs s'intéressent de plus en plus à l'analyse de l'information sémantique. Celle-ci permet d'apporter un critère de décision supplémentaire aux techniques d'appariements traditionnels (Abadie, 2012). De nombreuses mesures de proximité sémantique ont été définies dans la littérature (Hirst et St Onge, 1998). Un état de l'art complet sur ces mesures est présenté dans (Patwardham, 2003). Dans ce mémoire, nous nous limitons à la présentation de la mesure de Wu-Palmer (Wu et Palmer, 1994).

La mesure de Wu-Palmer est une mesure basée sur l'utilisation d'une taxonomie de domaine. Elle est généralement choisie pour sa simplicité de mise en œuvre. Celle-ci établit la valeur de similarité entre deux concepts d'une même taxonomie grâce à la distance à leur plus petit généralisant commun (Fig3. 16). En effet, si C est le plus petit généralisant commun de deux concepts C1 et C2, la distance sémantique est définie de la manière suivante :

$$d_s = 1 - \frac{2 * prof(C)}{prof(C_1) + prof(C_2)}$$

- Prof(C): désigne la profondeur de C qui représente le nombre d'arcs qui séparent C de la racine de la taxonomie,
- Prof(C_i): le nombre d'arcs qui séparent le concept C_i de la racine de la taxonomie, en passant par C.

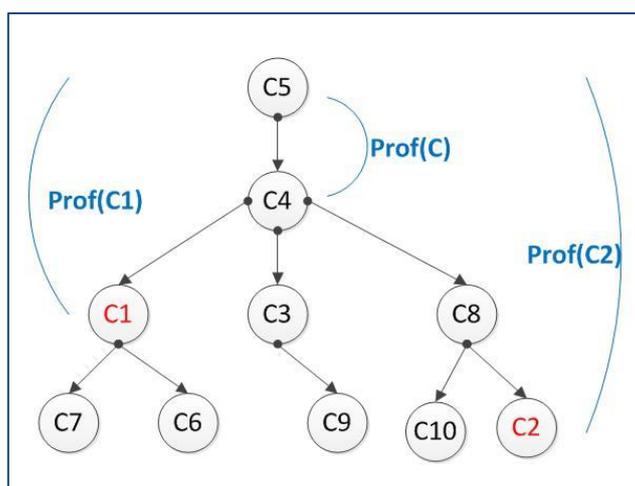


Fig3. 16. Schématisation du calcul de profondeur dans la mesure sémantique de Wu-Palmer (Adopté de Wu et Palmer, 1994)

3.5.4 Le reengineering des données

Le reengineering des données, désigné en français par la réingénierie des données, permet de dériver une nouvelle base de données à partir d'une base de données existante en adaptant en conséquence les composants logiciels (Cleve et al, 2006). Elle consiste en une traduction du schéma source vers le schéma cible, une conversion des données à travers un processus d'extraction, de transformation et de chargement et enfin une étape de conversion des programmes pour l'accès à la nouvelle base de données (Cleve et al, 2006). Le reengineering est un processus d'adaptation des systèmes et/ou structures de données pour répondre à de nouvelles spécifications.

Les premières données qui vont peupler la base de données 3D collaborative sont les données 2.5D qui existent dans les inventaires topographiques. Cependant, ces données doivent subir un processus de reengineering pour répondre aux nouvelles spécifications du schéma collaboratif en termes de géométrie et de sémantique. A noter que dans le futur, les données 3D coproduites selon les spécifications communes pourraient facilement s'intégrer dans la base de données collaborative.

3.6 Conclusion

Avec le besoin d'échange des connaissances sur le territoire, de nombreuses formes collaboratives voient le jour. Les infrastructures de données spatiales se développent à un niveau national, régional et international. Elles instaurent une logique de collaboration autour des données pour les rendre largement accessibles dans un cadre interopérable. Les SIG sont utilisés comme des outils participatifs pour assister les processus décisionnels. Cependant, le concept de collaboration tel que défini dans la littérature prend un sens plus large qui requiert la participation active et volontaire pour réaliser des objectifs plus ambitieux qui dépassent les capacités organisationnelles.

L'utilité de la collaboration est établie, mais pourquoi l'orienter dans un contexte de SIG 3D collaboratif? Le SIG 3D collaboratif est un système novateur qui vise à réorienter les solutions vers la conception collaborative. C'est une façon de se détacher des anciennes

pratiques qui ont donné lieu à des SIG Intra organisationnels plaqués sur une culture organisationnelle et qui se réduisent à des architectures technologiques généralement sous exploitées par les utilisateurs. Les SIG 3D collaboratifs permettent de sortir les SIG de leurs carcans traditionnels en leur attribuant une autre vision : celle de l'étude des besoins, de la mise en commun des expériences et des ressources humaines et matérielles, de l'intégration des connaissances.

Les SIG 3D collaboratifs ouvrent de nouvelles perspectives. Mais leur mise en œuvre et leur appropriation collective posent des problèmes méthodologiques. L'une des principales difficultés reste de structurer l'information dans un système cohérent pour pouvoir la partager, l'exploiter et la valoriser. Aussi, il faut savoir comment rapatrier les solutions existantes provenant des différentes parties dans le nouveau système. La conception collective est loin de répondre à ce besoin. Le problème ne se réduit pas à un simple partage de l'information pour lequel il existe des solutions techniques mais le grand défi est l'ajout d'une plus-value aux données existantes et leurs confrontations pour ressortir les plus pertinentes et leur intégration dans la nouvelle solution (Rousson et Roche, 2007). Si ces problématiques s'imposent à une étape du processus, la coproduction de données 3D selon de nouvelles spécifications permettra de les dépasser dans le futur.

Si l'utilité du SIG 3D collaboratif est démontrée, nous pouvons nous poser la question sur l'aspect conceptuel pour sa mise en œuvre. Les organismes doivent disposer d'un outil méthodologique qui oriente les réflexions sur les aspects à prendre en charge dans le projet ainsi que les étapes principales à valoriser. Le caractère multidimensionnel du SIG 3D collaboratif requiert une méthode adaptée pour piloter le travail de conception. C'est l'objet du prochain chapitre dans lequel nous analysons les aspects conceptuels autour du SIG 3D collaboratif.

CHAPITRE4. LE SIG 3D COLLABORATIF: ASPECTS CONCEPTUELS

4.1 Introduction

Dans la mise en place de tout projet géomatique, une plus grande part de l'investissement revient à l'acquisition des données, au développement et à l'implantation des solutions technologiques. Une bonne partie de ces projets est vouée à l'échec pour des raisons organisationnelles et humaines. Les approches de mise en place de SIG sont souvent conduites sans recours à une méthode rationnelle et structurée. L'acquisition prématurée du SIG logiciel est un vrai frein à l'exploitation des fonctionnalités étendues d'un SIG en tant que système organisationnel. Les résultats sont souvent encapsulés dans un cadre technique et la plupart du temps en dessous des attentes de l'organisation.

Les SIG, malgré leurs apports incontestables aux techniques de traitement de l'information, présentent encore des problèmes au niveau conceptuel (Ben Youssef, 2010). Les approches traditionnelles concentrent les efforts sur les aspects liés à la modélisation technique et ne permettent pas de préciser, ni d'analyser les aspects organisationnels et sociaux autour des solutions géomatiques. Les phases préliminaires d'étude de faisabilité, d'identification de la problématique et de diagnostic sont souvent sous estimées et figées dans le contexte de l'existant. Les démarches doivent plutôt tendre vers une approche systémique dépassant le cartésianisme et permettant de tenir compte des différentes composantes du système et de leurs relations.

Plusieurs réalisations technologiques 3D ont marqué les projets géomatiques. Un grand effort a été fourni dans la modélisation et la structuration des données, malgré les contraintes posées par la diversité des utilisations et la multiplicité des visions, qui rend limitée l'efficacité d'une structure de données unique. Les méthodes de travail sont de plus en plus formalisées et plus conformes aux règles de l'art en matière d'ingénierie des systèmes d'information. Le développement des SIG 3D a atteint un bon niveau de qualité du point de vue technologique.

Le SIG 3D collaboratif constitue une évolution organisationnelle. Sa mise en place et sa diffusion sont fortement affectées par la nature du contexte organisationnel dans lequel il s'implante et aussi par des facteurs humains et sociaux. Le déterminisme technologique doit être évité. Les organisations doivent copiloter le développement du projet qui doit les agencer par rapport aux solutions technologiques. Le SIG 3D collaboratif ne peut se développer sans une forte coordination entre les acteurs dans un cadre méthodologique propice au travail collaboratif.

Dans cette partie, nous présentons le SIG 3D collaboratif dans un contexte conceptuel qui traite la question méthodologique de leur mise en place. Nous nous ne prétendons pas

fournir une recette complète prête à l'emploi, mais notre objectif est de cerner les questions principales sur l'aspect méthodologique autour de la mise en place d'un SIG 3D collaboratif. Bien que nous présentions les étapes selon un certain cheminement, le contexte réel d'application pourrait les adapter ou les agencer différemment en fonction du besoin.

Nous introduisons le chapitre par une brève présentation de la littérature sur les formalismes et les méthodes conceptuelles pour les SIG, en démontrant leur insuffisance face aux besoins émergents sur la gestion des données spatiales en termes d'interopérabilité et de collaboration. Nous recentrons sur le besoin d'une méthode adaptée pour conduire un projet SIG 3D collaboratif, puis nous présentons notre proposition d'une démarche conceptuelle sous la forme d'un ensemble d'étapes génériques pour lesquelles nous avançons des propositions de méthodes et d'outils pour les résoudre.

4.2 Méthodes et formalismes de conception pour les applications géomatiques

L'importance stratégique et l'usage généralisé de l'information géographique ont orienté la recherche vers le développement de formalismes et méthodes pour faciliter la modélisation et la conception des SIG (Miralles, 2006). Dans ce contexte, les méthodes Orienté Objet (OO) ont démontré leur pertinence. Elles se basent sur une modélisation intuitive du monde réel en objets encapsulant les données et les traitements. Le but des formalismes est de structurer l'information géographique dans des diagrammes qui permettent la modélisation des types géographiques, des relations spatiales, des dimensions (spatiale, temporelle, etc.) (Pinet et al, 2003). La recherche a donné lieu à plusieurs formalismes et méthodes OO comme *MECOSIG*, *OMEGA*, *T-OMEGA*, *MADS*, *GeoFrame*, *GeoUML*, etc. Ces méthodes ont fait l'objet de plusieurs états de l'art dont nous citons: Friis-Christensen et al. (2001); Pinet et al (2003); Miralles (2006); Duboisset (2007); (Ben Youssef, 2010).

4.2.1 Les formalismes

Le formalisme Entité/Relation, qui a pour longtemps connu un grand succès, a été étendu au formalisme MODUL-R (Bédard et al. 1992; Bédard et al. 1996; Caron, 1991) pour renseigner la spatialité et/ou la temporalité des entités référencées, puis a été ensuite abandonné au profit du formalisme objet et du langage UML (Miralles, 2006).

Le formalisme UML (*Unified Modeling Language*) est une approche de modélisation Orientée Objet qui est maintenant établie comme un standard pour la modélisation d'applications relevant de plusieurs domaines comme les SIG (Brodeur et al, 2000) à travers de nombreuses extensions. UML permet la conception de plusieurs diagrammes (statiques ou dynamiques) (Kacem, 2008) permettant d'englober le cycle de vie d'un système mais sans représentation des concepts spatiaux (Ben Youssef, 2010). L'approche UML est largement utilisée en ingénierie et dans le monde académique. Elle doit son succès à l'utilisation de diagrammes et de notations facilement compréhensibles. Plusieurs outils AGL (*Atelier de Génie Logiciel*) basés sur le standard UML ont été développés (Khairuddin et Hashim, 2008).

Le formalisme CONGOO (*CONception Géographique Orientée Objet*) a été mis en œuvre dans le cadre de la méthode de conduite de projet MECOSIG (*Méthode de CONception des Systèmes d'Information Géographique*) (Pantazis et Donnay, 1996). Ce formalisme définit trois types d'objets: les simples, les composés et les complexes avec les trois types d'implantation ponctuelle, linéaire et polygonale (Billen, 2002). Cependant, les concepts SIG couverts par ce formalisme (*Fig4.1*) ne tiennent pas compte de la temporalité et des

- Phase d'analyse préalable: elle est consacrée à la mise en place du cadre du projet
- Phase de conception
- Phase de développement: elle intègre l'implémentation et la mise en place des applications
- Phase d'audit: elle est dédiée à l'évaluation et l'évolution des applications réalisées.

La méthode MECOSIG a été conçue pour l'informatisation de SIG existants ou leur conception, une opération qui est souvent désignée par la «géomatization des organisations» (Pantazis et Donnay, 1996). La méthode est centrée sur l'organisation et non sur le projet. Elle regroupe un ensemble de principes, de démarches et d'outils théoriques. C'est une méthode modulable et ouverte parce qu'elle constitue «une intégration méthodologique» de plusieurs démarches et outils et ne préconise pas un schéma déterministe de gestion de projets SIG. MECOSIG propose la conduite du projet SIG selon quatre niveaux d'abstraction: *un niveau descriptif, un niveau conceptuel, un niveau logico/physique et un niveau organisationnel*, et sur base de cinq classes de préoccupations: *Données, Flux de données, Traitements, Intégration et Organisation* (Pantazis et Donnay, 1996). L'analyse est conduite selon la matrice de conduite de projet (Fig4.2) où chaque niveau d'abstraction analyse les différentes classes de préoccupations, en fonction de l'étape de la démarche.

		Classes d'abstraction				
		Organisation	Donnée	Flux de données	Traitement	Intégration
Niveaux d'analyse	Descriptif					
	Conceptuel					
	Organisationnel					
	Logico Physique					

Fig4. 2. Les niveaux d'abstraction et les classes de préoccupations de MECOSIG

MECOSIG propose une démarche méthodologique très riche prenant en charge les différents cycles d'un projet SIG (Fig4.3), en laissant au concepteur le choix entre plusieurs cheminements possibles.

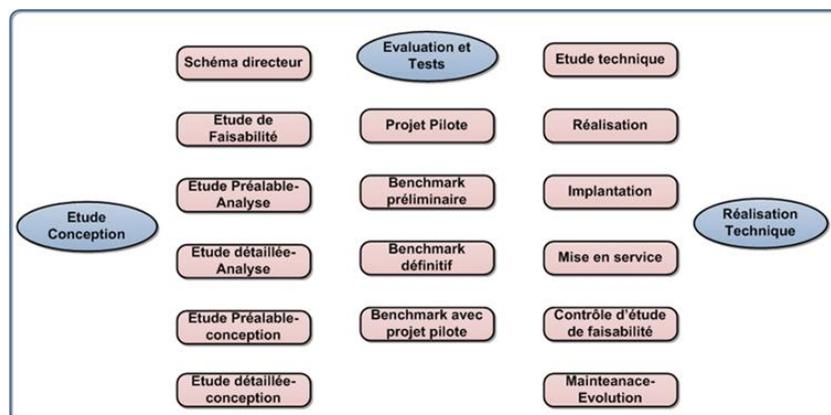


Fig4. 3. Les différentes étapes de la démarche MECOSIG classées par catégorie

4.3 Le besoin d'une méthode de conception pour un SIG 3D collaboratif

La mise en place d'un SIG en général suscite un cadre méthodologique répondant aux besoins spécifiques de tels systèmes de par la nature des données manipulées, de leurs complexités, de leur volume, et du nombre d'acteurs intervenant à plusieurs niveaux dans l'organisation (Ben Youssef, 2010). Aujourd'hui, les SIG doivent prendre en charge, au niveau conceptuel, les besoins émergents qui s'imposent dans le contexte de l'information géographique. Ces besoins concernent l'aspect multidimensionnel des données, leur interopérabilité et leur potentiel collaboratif.

Par ailleurs, on enregistre une réticence à l'évolution vers la 3D pour un bon nombre d'organismes. Le manque ou l'insuffisance des connaissances dans le domaine de la 3D ainsi que l'absence d'une approche générique pour concevoir des solutions géomatiques 3D interopérables apportent une part d'explication au problème. Les SIG 3D ne sont pas épargnés de cette lacune méthodologique. Leur conception collaborative est une solution prometteuse qui permettrait de maîtriser les aspects conceptuels et techniques qui se posent dans le contexte de la 3D à travers un environnement de partage de la connaissance dans un cadre collaboratif. De par son caractère innovant, le SIG 3D collaboratif fait émerger le besoin à une méthode adaptée de conception et de mise en œuvre. Un tel besoin se trouve justifié par les caractéristiques spécifiques du projet ainsi que l'insuffisance des méthodes conceptuelles traditionnelles.

Le SIG 3D collaboratif, de par sa dimension collaborative, impose des contraintes additionnelles par rapport aux SIG classiques en termes de conception et de développement. La collaboration introduit une plus grande complexité organisationnelle et une surcharge informationnelle (Darses, 2009). En outre, la prise en charge de la 3D, un produit non encore mature dans bon nombre d'organisations, engendre des contraintes techniques et organisationnelles d'appropriation, d'intégration et de gestion collaborative. En résumé, le projet SIG 3D collaboratif possède les caractéristiques suivantes:

- Le projet revêt un caractère complexe vu la multiplicité des variables à gérer: plusieurs partenaires, plusieurs systèmes 2D/2.5D existants, des niveaux différents en terme d'appropriation de la 3D, etc.
- La multiplicité des acteurs donne lieu à des perceptions différentes du problème. Chaque organisation est porteuse d'une réflexion différente autour des données et des besoins auxquels le SIG 3D doit répondre.
- Le projet s'insère dans un contexte dynamique et doit prendre en charge les grandes orientations autour des données 3D en termes de standardisation et de sollicitations institutionnelles comme INSPIRE.

Par rapport aux SIG traditionnels, le SIG 3D collaboratif possède deux dimensions qui doivent être analysées, implicitement ou explicitement, dans toutes les étapes conceptuelles:

- Le SIG 3D collaboratif en tant que « Système d'Information Géographique » qui s'apparente à un projet SIG 3D "classique".
- Le SIG 3D collaboratif en tant que « Sous-Système » s'intégrant dans un environnement global qui regroupe d'autres sous systèmes existants. Ces derniers regroupent les modèles 2D/2.5D, éventuellement des modèles 3D, qui entreprennent avec le modèle collaboratif des relations de flux d'information.

Les démarches conceptuelles classiques comme celle de la méthode MECOSIG présentent des insuffisances par rapport à notre objectif de conception de SIG 3D collaboratif. Ces solutions sont généralement conçues pour la mise en place d'un SIG intra-organisationnel et ne considèrent pas l'aspect collaboratif et les questions autour de l'interopérabilité des données. Ces démarches supposent généralement une connaissance préalable des objectifs, ce qui n'est pas le cas dans un processus de collaboration où les enjeux dépassent le cadre intra organisationnel, les visions sont divergentes et hétérogènes et les objectifs souvent mal perçus au début du projet. Les méthodes de conception d'applications géomatiques doivent être ainsi retravaillées pour se rapprocher de l'état de l'art technologique et organisationnel actuel dans le contexte de la 3D.

Nous visons ainsi une méthode de conception pour un SIG 3D collaboratif qui analyse la question au regard du caractère collaboratif du projet et qui aborde les questions conceptuelles autour de la donnée 3D. Nous ne prétendons pas une méthode universelle mais nous proposons un cadre méthodologique générique qui peut servir de ligne directrice pour la conduite du projet.

4.4 La méthode: Principes et type d'approche

La mise en œuvre d'un SIG 3D collaboratif requiert une méthode adaptée qui offre aux collaborateurs un cadre méthodologique pour support du travail collaboratif de conception et de mise en œuvre du système. La nature du projet incombe à la méthode plusieurs principes que nous résumons dans ce qui suit:

- Sauvegarde de l'aspect ouvert et non contraignant à travers un cadre méthodologique flexible permettant au concepteur d'adapter le processus et les solutions conceptuelles aux contraintes existantes: la démarche ne peut pas être universelle vu la multiplicité des variables autour du projet.
- Valorisation du processus plutôt que le résultat.
- Sauvegarde de l'aspect générique applicable à tous les SIG collaboratifs.
- Proposition d'outils et de méthodes pour faciliter les activités de coordination.
- Proposition de moyens d'aides à l'analyse, à la conception du problème et à l'évaluation des solutions.
- Valorisation de l'interopérabilité par la proposition de directives à suivre en termes de standardisation, de modélisation et d'échange de l'information géographique 3D.

Le SIG 3D collaboratif ne peut pas être conçu et mis en place sous forme d'une solution statique mais présente plutôt un caractère dynamique et évolutif. Par ailleurs, le développement d'un nouveau système en partant de zéro, sans intégrer les connaissances existantes dans les inventaires géographiques, est une solution coûteuse en termes de temps et de ressources. La réutilisation des bases de données existantes, comme première option de solution peut être une source de motivation pour les organismes. La démarche doit ainsi considérer deux niveaux de développement du SIG 3D collaboratif: un niveau d'implantation (de la version initiale) qui se base sur un flux limité des informations existantes et un niveau d'évolution qui prévoit l'intégration d'autres flux d'informations dans le futur pour alimenter le SIG 3D. D'autre part, la démarche a la particularité de ne pas être dédiée à une organisation comme c'est le cas de MECOSIG mais elle est, par analogie, centrée sur une organisation dite «abstraite» qui représente toutes les organisations partenaires. Dans la

suite de ce document, nous désignons cette organisation dite «abstraite» par l'Organisation (avec un "O").

La diffusion du SIG 3D collaboratif comme technologie géomatique innovante dans les organisations est tributaire de deux facteurs importants qui sont la nature même de la solution et le contexte intra/inter organisationnel dans lequel le projet sera implanté. Il en sort que la démarche conceptuelle doit s'articuler autour d'une perspective de conception adaptée au projet. Dans la littérature, trois perspectives ont été relevées par Campbell et Masser (1995) pour l'implantation des technologies géomatiques dans les organisations (Fig4.4):

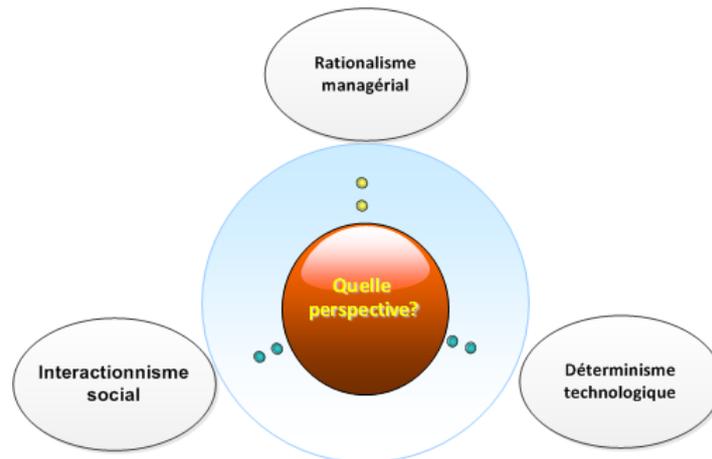


Fig4. 4. Perspectives d'implantation des technologies géomatiques

- Le déterminisme technologique: c'est une perspective basée sur l'innovation. La démarche est essentiellement technique. Son succès est assuré par la performance des solutions technologiques proposées.
- Le rationalisme managérial: la solution proposée est justifiée et défendue comme conséquence logique d'un processus de gestion rationnelle, et pas seulement comme une affaire «technique». Son succès n'est pas garanti et dépend fortement de la méthodologie suivie.
- L'interactionnisme social: Selon cette dernière perspective, les résultats et le succès des solutions dépendent de l'interaction entre la technologie et l'organisation. Les mêmes solutions géomatiques, mises en œuvre dans des organisations et suivant des méthodes similaires, peuvent donner des résultats différents.

Dans le cadre d'Infrastructures de Données Spatiales, deux approches ont été identifiées dans la littérature. La première stratégie est dénommée « *Techno-Centric* » et l'autre « *Socio-Technical* » (Petch et Reeve, 1999) (cité par Rajabifard et al. 2002). Cette deuxième est suggérée dans le travail de Rajabifard comme la plus prometteuse pour conduire un projet IDS. Elle permet de prendre en considération les individus impliqués dans la mise en œuvre d'une IDS et les agencer convenablement avec les composantes techniques et organisationnelles (Rodriguez-Pabon, 2005).

La démarche de conception d'un SIG 3D collaboratif valorise, par nature, la dimension organisationnelle et sociale. Les solutions techniques et rationnelles sont ainsi inconcevables. La démarche doit valoriser l'interaction entre la composante technique et organisationnelle en favorisant le consensus et l'adaptabilité des solutions au contexte inter

organisationnel à travers une approche sociotechnique et collaborative prenant en charge la composante technique et organisationnelle dans un cadre collaboratif qui favorise l'intérêt de l'Organisation (Fig4.5).

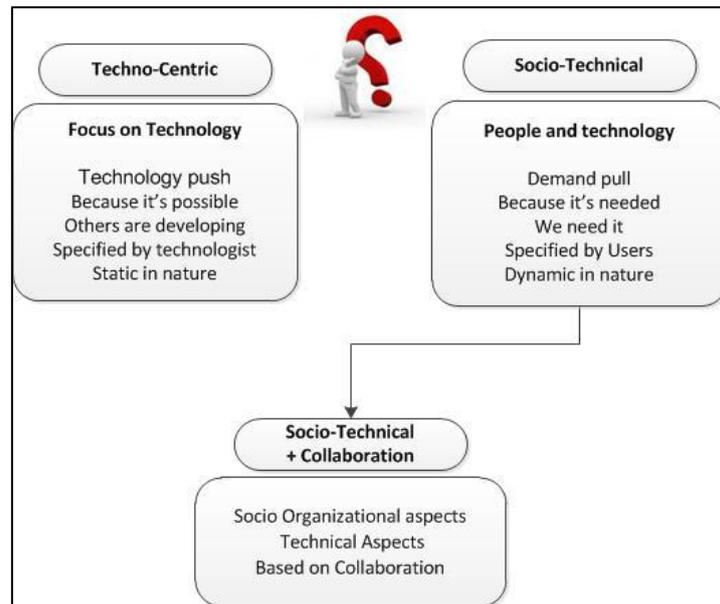


Fig4. 5. Approche proposée pour l'implantation d'un SIG 3D collaboratif (Inspiré de Rajabifard et al. (2002))

4.5 La démarche méthodologique

La démarche conceptuelle pour un SIG 3D collaboratif ne peut pas être cartésienne. Elle est plutôt systémique. Les étapes sont interdépendantes et évolutives et l'échelle d'analyse augmente au fur à mesure de l'avancement dans la démarche. En outre, certaines étapes sont itératives: des nœuds de prise de décision peuvent renvoyer à des étapes antérieures pour révision et mise à jour des solutions.

La méthode de conception du SIG 3D collaboratif que nous proposons s'appuie sur des principes, propose une démarche méthodologique ainsi que des outils de support pour la conception, la mise en œuvre et l'évaluation du système. Nous avons choisi de présenter ces composantes dans le cadre d'une démarche intégrée dans laquelle les étapes sont regroupées par catégories d'activités sans qu'un ordre précis soit imposé. La figure 4.6 présente un exemple de cheminement de l'architecture globale de la démarche conceptuelle que nous proposons pour le SIG 3D collaboratif et dont les étapes seront exposées par la suite. Le cheminement proposé dans la figure est présenté comme option basique et non unique pour l'application de la démarche.

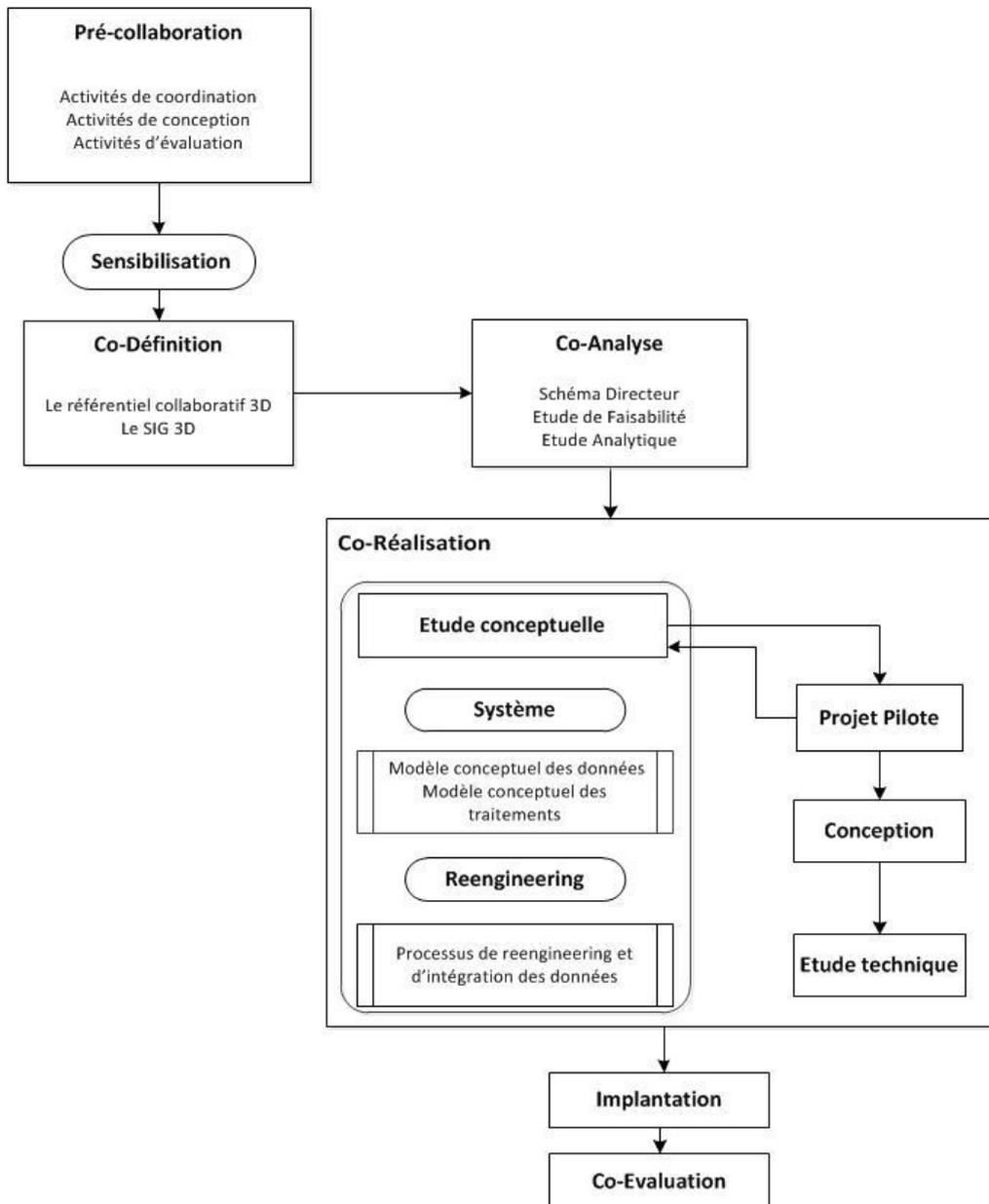


Fig4. 6. Démarche méthodologique: exemple de cheminement

4.5.1 La Pré-Collaboration

La phase de Pré-collaboration, comme son nom l'indique, est une phase qui s'impose au début du projet et en général dans toute action collaborative. C'est une phase préparatoire qui permet d'instaurer une assise fondamentale pour la bonne conduite du projet en vue d'optimiser les activités de communication, de coordination et de conception collaborative et les faire fonctionner dans un cadre interopérable. Telle que définie, la Pré-collaboration requiert la mise en place d'un environnement collaboratif et la définition d'outils d'aide au travail de conception et d'évaluation des solutions (Fig4.7).

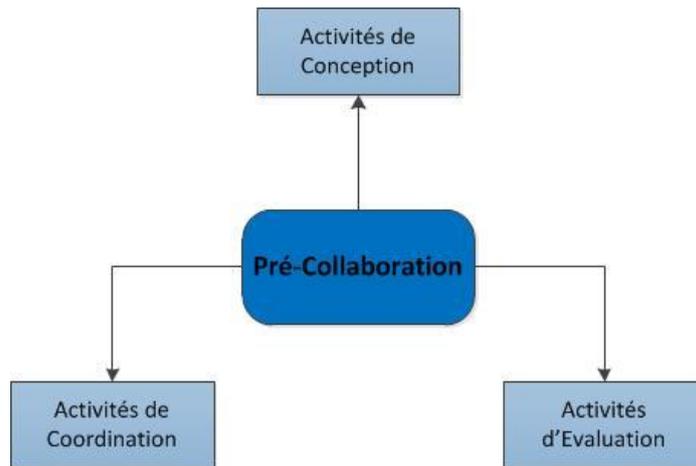


Fig4. 7. La Pré-Collaboration

4.5.1.1 Les activités de coordination

La composante humaine a une dimension importante dans un projet SIG 3D collaboratif. Le groupe de travail est assimilé à un système dynamique en interactions permanentes qui dépassent les limites du travail individuel. Des mécanismes de régulation et de coordination entre les différents acteurs sont requis pour faire converger des efforts individuels vers des actions conjointes. L'interaction entre les acteurs est requise dans les premières étapes du projet pour définir le problème, le structurer et aboutir à un consensus sur la stratégie à entreprendre. Par ailleurs, la communication et la coordination jouent un rôle primordial dans l'intégration et le partage des connaissances. Il en résulte que le projet nécessite la définition d'un environnement collaboratif qui facilite l'exécution coopérative de la démarche. Cet environnement collaboratif requiert la désignation d'un comité de pilotage pour le projet ainsi que des techniques d'aide au travail collaboratif.

La désignation d'un comité de pilotage qui soit représentatif, compétent et décisif est requise pour la bonne conduite du projet. Le comité de pilotage est assimilé à un groupe de travail restreint qui sert de locomotive pour l'exécution du projet et permet de faciliter la capitalisation des connaissances dispersées entre les organisations et la prise de décision. En plus, le travail doit être supervisé par un concepteur analyste qui joue un rôle de facilitateur et de modérateur pour faire converger les visions vers une forme consentie par les différents partenaires. En outre, le concepteur analyste joue le rôle d'expert dans le domaine.

Dans le cadre d'un travail de conception collective, le groupe de travail est assimilé à une structure d'«entreprise étendue» (Darses, 2009), où «*On rassemble, le temps du projet, des acteurs géographiquement dispersés, qui doivent collaborer en face à face mais aussi à distance, en mode synchrone ou asynchrone*» (Darses, 2009). La définition d'un environnement collaboratif permet à chaque acteur d'avoir une vision globale de l'environnement de travail auquel il participe et dans lequel il interagit ainsi que l'impact de ses actions et de celles des autres sur le déroulement du processus collaboratif. Le travail collaboratif nécessite ainsi des techniques d'organisation de la dynamique de groupe et des techniques d'aide au travail collaboratif. Dans ce sens, il existe des solutions informatiques qu'on nomme "*Groupware*" (Fig4.8) qui assurent des fonctions allant du partage de documentation, vers des outils qui assurent des tâches à un niveau plus élevé comme

l'assistance à la construction collective d'un problème et au choix des solutions (*Logiciel Concept System*) (Joliveau, 2004)

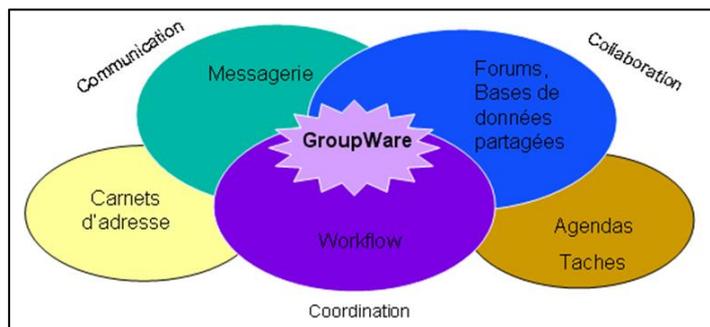


Fig4. 8. Le Groupware

Le terme "*Groupware*" se rapporte aux systèmes et outils informatiques facilitant le travail en groupe, tandis que le CSCW (*Computer Supported Collaborative Work*) regroupe d'autres aspects autour du travail collaboratif relevant de l'intelligence artificielle, la sociologie, la psychologie, etc. (Keita, 2007). Les systèmes CSCW peuvent être classés selon les deux dimensions temporelle et spatiale (*Tab4.1*). Les techniques du *Groupware* offrent un bon support pour le travail collaboratif. Elles sont basées sur l'esprit de groupe, les interfaces multi utilisateurs, la gestion des droits d'accès, la communication et la coordination ainsi que la constitution d'un environnement hétérogène et ouvert qui intègre les systèmes mono utilisateurs existants (Keita, 2007). Les activités réalisées peuvent être classées en différentes catégories: Stockage des données (système de partage de fichier, CVS, systèmes de contrôle de version, etc.); Communication synchrone et asynchrone (Email, audio/Vidéo conférence, messagerie instantanée, etc.); Organisation du travail: systèmes workflow, systèmes d'aide à la décision de groupe, etc.

	Même temps (moment)	Temps (moments) différents
Même place (lieu)	Face-à-face (salles de conférence, salles de classe)	Interaction asynchrone (programmation de projet, outils de coordination)
Places (lieux) différentes	Synchrone distribué (éditeurs partagés, interfaces vidéo)	Asynchrone distribué (e-mail, weblog)

Tab4. 1. Classification des systèmes CSCW (Keita, 2007)

La conception et le développement d'outils collaboratifs est devenu un enjeu central de la recherche en collaboration (St-Aubin, 2011). Plusieurs principes autour du développement d'outils collaboratifs ont été proposés par les chercheurs pour faciliter l'intégration et la participation de tous les acteurs impliqués (Mayer, 2005; Gross, 2007).

Dans notre contexte, la collaboration porte essentiellement sur les données spatiales. Leur intégration dans le cadre du projet nécessite la mise en place d'interfaces partagées pour pouvoir intégrer les connaissances et centraliser l'information en vue de faciliter le travail

conceptuel et le test des solutions de reengineering. L'accès à l'information peut être fait selon une hiérarchie établie ou de manière libre entre les acteurs.

4.5.1.2 Les activités de conception collaborative

La conception est une activité complexe nécessitant l'intégration de multiples points de vue (cognitif, technique, social, économique, organisationnel, temporel, etc.) (Belkadi et al, 2004). Les modèles normatifs traditionnels de la conception doivent être transformés pour rendre compte de manière explicite du caractère résolument collectif d'un processus de conception (Darses, 2009). Les recherches menées en ingénierie collaborative cherchent à intégrer explicitement les dimensions sociocognitives aux modèles du processus de conception (Darses, 2009). Un autre aspect fondamental dans le travail de conception concerne la traçabilité de l'activité de conception et le partage des connaissances dans un cadre collaboratif (Belkadi et al, 2007). Les auteurs proposent une approche basée sur la modélisation de la situation de travail et un support de travail collaboratif informatisé pour donner aux concepteurs une traçabilité en temps réel de leur activité, leur permettant de structurer puis de réutiliser les informations et les connaissances passées et présentes afin de résoudre ultérieurement de nouveaux problèmes. Par ailleurs, les solutions conceptuelles doivent aboutir à une convergence. Des méthodes, comme l'analyse fonctionnelle, la décomposition des tâches ou les méthodologies de résolution de problèmes en groupe permettent d'encadrer l'analyse collective d'un problème et la recherche de solutions (Chauvel, 2001; Sacre, 2001) (cités par Darses, 2009).

Dans le cadre d'un projet SIG 3D collaboratif, nous nous sommes inspirés de la subdivision des activités de conception en deux formes : « *Co-conception* » et « *Conception distribuée* », qui a été proposée par Darses et Falzon (1996). Ces deux formes s'ajoutent au travail de conception conduit par le concepteur analyste, une fois les consensus établis, et qui s'apparente à la forme de conception d'un SIG classique. La Co-conception décrit les phases du projet au cours desquelles les partenaires se rassemblent (de façon co localisée ou distante) afin de définir conjointement le projet et aboutir à un consensus sur le scénario à adopter. Alors que la conception distribuée désigne la phase au cours de laquelle sont traités des aspects liés à la coordination temporelle des ressources et des tâches (Darses, 2009). Les trois formes ne sont pas indépendantes mais en interactions continues le long du projet (Fig4.9)

Pour assister le processus de conception conduit par le concepteur analyste, la Matrice de Conduite de Projet (MCP) adoptée dans le cadre de la méthode MECOSIG s'avère un outil important. Cette matrice est définie par des colonnes qui représentent les classes de préoccupation et des lignes qui sont associées aux niveaux d'abstraction (Fig4.2). Nous proposons de l'adopter comme outil d'analyse en lui apportant certaines modifications en vue de l'adapter au contexte du projet.

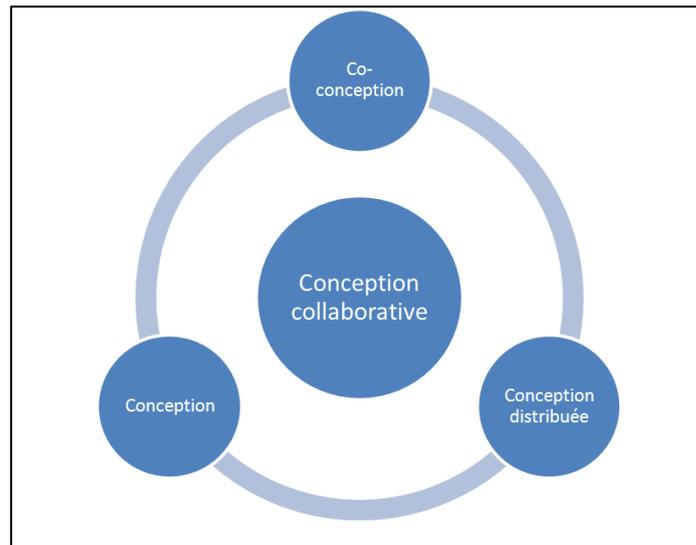


Fig4. 9. Formes de conception collaborative du système

Les données 2.5D/3D existantes constituent le cœur de la première version d'implantation du SIG 3D collaboratif. Une bonne partie du travail conceptuel est centrée sur leur intégration dans le futur système. Nous considérons ainsi les «Données» comme classe principale (méta-classe) qui encapsule toutes les questions qui se rapportent aux données et pour lesquelles nous ne pouvons pas prévoir autant de classes. La question d'interopérabilité est primordiale et nous proposons de lui associer une classe dite: classe «*Interopérabilité*». L'avantage est de pouvoir mesurer l'interopérabilité des données existantes par rapport aux solutions conceptuelles et son impact sur les solutions de reengineering. Pour les niveaux d'abstraction, nous proposons une analyse croisée selon trois niveaux: un niveau *Descriptif-Analytique*, un niveau *Conceptuel* et un niveau *Technique*. Le niveau Descriptif/Analytique permet de faire un diagnostic et une analyse de l'existant au regard des objectifs. Le niveau conceptuel étudie toutes les solutions conceptuelles autour du projet. Par niveau technique, nous faisons référence au niveau qui permet au concepteur de mettre en œuvre les solutions conceptuelles de natures diverses que soient-elles sans s'attacher uniquement au niveau d'implémentation de la base de données. Le niveau organisationnel, n'est pas pris tel que défini dans la méthode MECOSIG. En effet, dans un SIG 3D collaboratif, les contraintes organisationnelles ne doivent pas trop influencer les choix conceptuels. La collaboration est une réponse à l'incapacité individuelle de chaque organisation adhérente au projet dans le sens où certaines contraintes organisationnelles sont solutionnées par le partage et l'échange des ressources et des expériences. Ce niveau est ainsi considéré au regard de l'ensemble des organisations (l'Organisation) pour pouvoir évaluer la capacité de l'Organisation à atteindre les objectifs escomptés. Dans les étapes conceptuelles, le retour aux organisations est essentiel pour un reengineering et nous le prévoyons comme étape consistante de la démarche (Hajji et Billen, 2012).

4.5.1.3 Les activités d'évaluation

L'évaluation peut concerner aussi bien le projet dans sa globalité après implantation et mise en service, que les solutions de conceptions intermédiaires qui interviennent durant le processus. La première forme d'évaluation sera présentée, ultérieurement, comme étape de la démarche. Nous nous limitons ici aux outils pouvant être utilisés pour supporter l'évaluation des solutions conceptuelles intermédiaires.

La prise de décision sur des solutions conceptuelles requiert des outils d'évaluation permettant de faciliter les choix entre les scénarios identifiés. Selon le cas, l'évaluation peut adopter des formes simples comme les matrices de comparaison basées sur la projection des solutions sur différents critères et leur comparaison en termes de ratios, comme elle peut faire appel à des analyses plus approfondies comme l'analyse SWOT, un acronyme pour "*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*" qui est une approche utilisée pour analyse des forces, faiblesses, des opportunités et des limites dans le cadre d'un projet ou dans toute situation de prise de décision (Hay et Castilla, 2006) concernant une entreprise ou une organisation (Istikdag et Zlatanova, 2009). L'analyse est conduite sous la forme d'une matrice (Tab4.2).

	Helpful to achieving the objective	Harmful to achieving the objective
Internal (attributes of the organisation)	Strengths	Weaknesses
External (attributes of the environment)	Opportunities	Threats

Tab4. 2. Matrice SWOT (Hay et Castilla, 2006)

Les forces et les faiblesses concernent, respectivement les attributs internes de l'Organisation qui sont utiles ou nocifs à la réalisation du projet. Par ailleurs, les opportunités représentent les conditions externes utiles pour le projet alors que les limites désignent celles qui peuvent handicaper sa réalisation.

4.5.2 La Sensibilisation

Le SIG 3D collaboratif conditionne la motivation, la volonté et l'engagement des différents partenaires. Cependant, les organisations ont généralement un regard très restrictif et douteux sur les avantages des actions collaboratives. Les réticences qui peuvent se manifester au début ou en cours du processus risquent d'entraver le projet ou le conduire à l'échec. Ainsi, la phase de sensibilisation, qui revêt déjà une importance dans les projets de géomatisation d'une organisation, a une plus grande plus-value dans le cas d'une action de collaboration (Hajji et Billen, 2012). Cependant, cette étape peut avoir un caractère temporaire et peut être optionnelle dans le futur, lorsque la solution SIG 3D collaboratif atteindrait un bon niveau de diffusion.

Le SIG 3D collaboratif doit être valorisé en démontrant ses avantages qui devraient s'aligner sur les orientations et les priorités organisationnelles dans la gestion de l'information spatiale. Il faut disposer d'études et de projets exemples pour aboutir à une sensibilisation de l'intérêt de sa mise en œuvre. La sensibilisation doit garder le principe de l'objectivité et du réalisme. En résumé, elle doit viser les objectifs suivants:

- Démontrer l'utilité de la collaboration et inciter les partenaires à y adhérer.
- Présenter de façon objective les avantages (partage de savoir-faire, des coûts, des données,...) et les inconvénients (processus longs, impacts organisationnels,...)
- Montrer d'une façon sommaire et objective les grandes lignes du projet.

- Convaincre de la faisabilité en faisant référence à des expériences concrètes.
- Démontrer l'infaisabilité individuelle

L'étape de sensibilisation peut être réalisée à travers des présentations (intra/inter-organisations), un montage de scénarios démontrant les apports du projet, des démonstrations sur des réalisations concrètes, etc.

4.5.3 La Co-Définition

Par Co-Définition, nous nous entendons la phase de définition collaborative du projet dans sa globalité. Comme nous l'avons déjà mentionné, le SIG 3D collaboratif est un projet dont les objectifs ne sont pas prédéfinis même s'il émerge autour d'un besoin commun. Au début du projet, les connaissances sont incomplètes et les problèmes sont souvent ouverts et non complètement définis. La définition des objectifs doit faire l'objet de discussions et de consentement entre les différents partenaires. Par ailleurs, les solutions ne sont pas préalablement connues et les stratégies de développement ne sont pas prédéterminées. Tel que défini, le projet possède les caractéristiques d'un «*Soft Problem*»: un problème qui n'est pas bien cerné et dont la structure est inconnue (Simonsen, 1994).

La Co-Définition porte sur deux aspects. Le premier concerne la définition d'un référentiel collaboratif 3D qui sert à baliser le chemin pour le travail conceptuel en mettant en place les briques essentielles pour collaborer autour des données géographiques 3D, dans un cadre d'interopérabilité technique et sémantique. Le deuxième aspect concerne la définition du projet en termes de besoins, d'objectifs et de stratégie d'action.

4.5.3.1 Le Référentiel Collaboratif 3D

En général, la collaboration autour des données 3D, requiert la définition d'un référentiel commun, qu'on désigne par référentiel collaboratif 3D, en vue de rendre la donnée 3D interopérable et lui attribuer un potentiel collaboratif. Le référentiel collaboratif 3D vise la construction d'une vision globale sur la représentation, la modélisation et l'échange des données 3D, à travers le choix d'un standard 3D, la définition d'une sémantique 3D dans le cadre d'une ontologie de domaine, l'alignement sur des recommandations d'actions internationales comme INSPIRE, etc. La mise en place d'un projet SIG 3D collaboratif vise aussi bien des objectifs techniques à court terme (comme la définition d'un modèle de référence 3D commun), que des objectifs à long terme (comme la mise en place d'une IDS 3D). Le référentiel collaboratif 3D offre une vision globale et des orientations à une échelle plus grande qui peut dépasser la dimension du projet. C'est une forme d'instauration d'un cadre général définissant des orientations à prendre en charge dans toutes les formes collaboratives autour des données 3D.

En terme d'interopérabilité 3D, la directive INSPIRE et le standard CityGML constituent, à notre vue, deux jalons importants qu'il faut considérer. Nous avons présenté dans la partie (3.5.1) de ce document les recommandations INSPIRE pour l'objet bâtiment qui représente une composante importante de l'espace géographique. Le standard CityGML, qui est une recommandation d'INSPIRE, est le candidat potentiel pour la standardisation des données 3D. Nous l'avons démontré dans la partie (1.3). Cependant, son utilisation pratique se heurte à plusieurs problèmes dont certains ont été reportés par Stoter et al (2011), à savoir:

- L'ambiguïté dans la définition du rôle du CityGML en tant que modèle d'échange et comme modèle de données;
- L'imprécision dans la définition des niveaux de détail et des relations entre eux;
- L'absence de programmes de validation de la géométrie du CityGML par les outils commerciaux;
- L'absence d'outil pour générer des données CityGML (en plus de la conversion des données existantes) engendre un travail consistant pour rendre les données conformes au format CityGML;
- Des développements sont nécessaires pour étendre son champ d'utilisation;
- Son caractère générique dans la définition des objets.

A travers nos investigations sur CityGML, nous pouvons confirmer les problèmes soulevés par Stoter et al (2011). Le caractère abstrait, générique et complexe est effectivement une problématique qui constitue un handicap majeur pour l'adoption du CityGML. La recherche a été plutôt centrée sur la traduction des modèles disponibles selon le schéma du CityGML, le réduisant ainsi à un format d'échange. Cependant, CityGML présente une sémantique riche qui peut dépasser les besoins et les ressources disponibles. Une solution optimale serait de définir un modèle 3D interopérable sur base des spécifications du CityGML en termes de schéma de données et qui prend en compte les besoins spécifiques d'un modèle 3D de référence.

La définition d'une ontologie de référence est un pilier fondamental pour le référentiel collaboratif 3D. Le but ultime de l'ontologie est de définir un vocabulaire commun pour assurer l'interopérabilité et réduire au minimum les problèmes d'intégration des données. L'ontologie est utilisée pour identifier les concepts, les relations et les règles et pour définir et conceptualiser la connaissance dans un domaine pour la rendre plus facile à modéliser (Keita, 2007). Dans les SIG, la définition la plus adoptée de l'ontologie est «une spécification de conceptualisation» (Gruber, 1995). La construction coopérative d'ontologies dans un environnement collaboratif permet de réunir les producteurs et utilisateurs potentiels des données de référence 3D pour aboutir à un consensus sur les concepts du domaine. Ce consensus est loin d'être trivial. Keita (2007) propose, dans le cadre du projet *Towntology* (projet européen qui vise à construire des ontologies dans le domaine urbain), une méthodologie pour aboutir à une ontologie pré-consensuelle en partant des opinions de différents experts, qui est ensuite utilisée comme ontologie d'ancrage pour une définition collaborative. Une solution couramment proposée consiste à recourir à une ontologie de haut niveau afin de disposer d'une définition commune des concepts les plus généraux du domaine pouvant constituer un socle de connaissances et un point d'ancrage commun (Abadie, 2012).

4.5.3.2 Le projet SIG 3D

La Co-Définition du projet consiste à explorer les différentes visions et converger vers une définition commune du problème au regard des objectifs qui va servir comme terrain nominal pour les étapes conceptuelles. Au cours de la définition du projet, des solutions globales sont proposées au fur et à mesure que les besoins et les objectifs sont identifiés. A ce niveau de la démarche, ce principe évite l'investigation dans des solutions ponctuelles et préfère leur caractère général. L'exploration du problème et sa définition doivent porter sur les deux dimensions du projet où le SIG 3D collaboratif est vu à la fois comme SIG de l'Organisation et aussi comme sous-système ayant des relations de flux d'informations avec les autres

sous systèmes existants. Aussi, le niveau d'implantation de la version initiale et le niveau d'évolution vers une version future doivent être considérés dans la définition des stratégies à adopter. Nous proposons une Co-Définition du projet autour de plusieurs étapes allant de la capture et l'analyse des besoins vers la planification des stratégies à entreprendre (Fig4. 10).

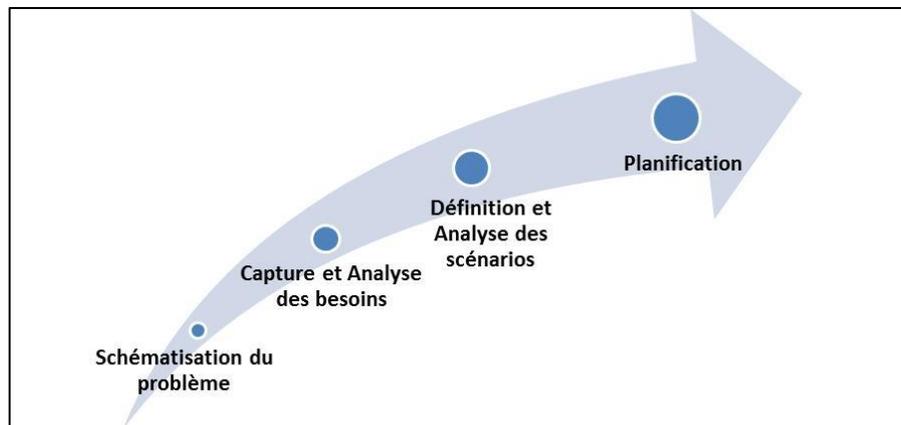


Fig4. 10. Les étapes de la Co-Définition du projet

- **Capture et Analyse des besoins**

Sachant que les objectifs des partenaires sont souvent réduits dans un contexte intra-organisationnel, cette étape se veut aussi une étape d'apprentissage, de concertation et de rapprochement des visions pour faire dissoudre les identités organisationnelles vers une définition d'objectifs communs. Cette étape doit être réalisée dans un contexte de communication entre les différents partenaires où le concepteur analyste joue un rôle de facilitateur. Il faut noter que les objectifs doivent être raisonnables et précis. Dans le cadre du SIG 3D, il faut les centrer sur la définition de l'information 3D de référence sans les réduire dans le seul contexte technique.

Les besoins sont explorés auprès des différents partenaires mais sont étudiés au regard de l'Organisation, sans trop s'attacher aux besoins spécifiques des différents partenaires. Le SIG 3D collaboratif se développe dans un contexte professionnel. Les besoins sont ainsi enquêtés auprès des partenaires du projet. Ces derniers peuvent avoir recours à des enquêtes auprès des utilisateurs hiérarchiques pour définir les besoins en 3D. La capture des besoins doit faire appel à des méthodes adaptées au niveau de la compétence des acteurs dans le domaine de la 3D. Nous identifions deux types de méthodes qui peuvent être complémentaires pour la capture des besoins: une méthode non directive basée sur l'expression libre et une méthode directive qui est généralement supervisée par le concepteur.

Les méthodes non directives peuvent s'articuler autour de sessions de *Brainstorming* pour aboutir à une définition préliminaire et rapide des objectifs à maintenir pour le projet. Les différents partenaires présentent leurs visions. Toutes les propositions sont acceptées et notées. Elles sont ensuite étudiées, modifiées ou combinées, parfois rejetées pour aboutir à un ensemble réduit de propositions. Vu que la méthode est non directive (basée sur l'expression libre et ouverte), elle demande un temps considérable pour trier, synthétiser les visions et les analyser. Le rôle du concepteur analyste est requis comme facilitateur pour faire converger les idées vers une définition commune du projet. Cette méthode est plus

adaptée quand les acteurs maîtrisent bien le domaine de la 3D et ont une vision claire des objectifs.

Contrairement aux sessions de *Brainstorming* où les visions sont formulées librement par les acteurs, la proposition de lignes directrices permet d'orienter la formulation des besoins dans un contexte spécifique. Elle peut faire appel à une version prédéfinie du problème «*Draft Problem*» établie par le concepteur analyste et qui servira de référence pour faire converger les idées. Cette méthode est moins coûteuse en termes d'effort d'analyse et de synthèse mais présente l'inconvénient de forcer la formulation des besoins vers des pistes implicitement définies par le concepteur en ignorant certains besoins qui pourraient être pertinents. Cette méthode prend généralement la forme de questionnaires. Elle est requise quand les acteurs n'ont pas une compétence suffisante dans le domaine de la 3D.

Au-delà du contexte du projet, la capture des besoins peut être également étendue à une communauté plus large d'utilisateurs pour favoriser l'apprentissage et stimuler les visions vers des besoins nouveaux non connus par les partenaires du projet. Des utilisateurs potentiels des données spatiales 3D peuvent être ainsi consultés pour collecter les besoins en termes de gestion de l'information 3D et les exploiter comme base de réflexion autour du projet.

- **Schématisation du problème**

L'architecture technique d'un SIG 3D s'apparente à celle d'un SIG classique, qui comprend une base de données, des flux d'informations ainsi qu'une interface d'interrogation et d'analyse. Spécifiquement, le SIG 3D collaboratif s'insère dans un environnement regroupant plusieurs sous-systèmes qui auront un apport informationnel important en termes de flux d'alimentation de la base de données collaborative. Le concept de sous-système reste générique, il peut inclure des modèles 2.5D/3D existants, des bases de données, des sources à prévoir dans le futur (modèles d'architectes, VGI, etc.). L'ensemble des composantes est schématisé selon une vision intégrée sur le futur SIG 3D qui repose sur le principe de l'approche systémique: «*Le tout est plus que la somme des parties*».

- **Définition et Analyse des scénarios**

Sur base de la vision schématique établie dans l'étape précédente, des scénarios de l'architecture du système et de sa mise en place sont proposés et analysés, en gardant un aspect global. Ils répondent à la question: «*Comment le SIG 3D doit s'implanter et évoluer par rapport à l'existant?*», en mettant en évidence les potentialités, les contraintes et les mesures d'impacts. Les scénarios doivent proposer des grandes lignes pour les solutions à adopter, en répondant à certains aspects comme: la stratégie de développement et celle d'intégration des bases de données (mono/multi représentation); la gestion de la maintenance et des accès; la stratégie de mise à jour, etc. Une analyse SWOT peut être requise à ce niveau pour piloter la prise de décision sur le scénario à retenir.

- **Planification**

Dans cette étape, il faut proposer une modélisation de l'architecture du système sur base du scénario retenu et élaborer une stratégie de mise en œuvre. Les deux phases du projet (de première installation et d'évolution) doivent être mises en évidence via la définition de deux stratégies d'actions selon un aspect global générique. Ces stratégies peuvent être révisées

et adaptées aux contraintes identifiées durant la suite du projet. La phase de planification est vue comme une étape de convergence vers une définition commune du projet et sur les grandes lignes de la stratégie à adopter pour sa mise en place.

Synthèse

Dans le cadre d'un projet SIG 3D collaboratif, la démarche de conception comporte des étapes de natures et de portées différentes. Les premières étapes privilégient la composante collaborative. Elles reposent sur le principe que la collaboration n'est pas une action ponctuelle, volontariste mais consiste en un processus évolutif. Les étapes précitées visent deux objectifs principaux: la définition d'un référentiel collaboratif 3D à travers des accords sur les grandes orientations à prendre en charge autour de la donnée 3D et ensuite la co-définition du projet à travers une exploration du problème dans un contexte systémique où toutes les composantes sont identifiées et intégrées selon une vision globale sur base de laquelle une stratégie de mise en œuvre est établie.

4.5.4 La Co-Analyse

La Co-Analyse permet d'étudier le projet avec un niveau de détail plus grand, à travers la mise en examen de la vision construite dans la phase de Co-Définition et sa soumission à une étude analytique. C'est une sorte de confrontation de la vision schématisée du projet avec l'état de l'existant au niveau des organisations. Plusieurs étapes sont jugées importantes pour l'analyse collaborative du projet, à savoir: le Schéma Directeur, l'Etude de Faisabilité et l'Etude Analytique, que nous présentons dans la suite. Ces étapes peuvent être conduites selon un processus itératif permettant de réviser les objectifs sur base des résultats de l'Etude Analytique et de l'Etude de Faisabilité.

4.5.4.1 Le Schéma Directeur

Dans les SIG classiques, le Schéma Directeur est généralement une étape de démarrage. Les objectifs sont centrés sur une seule organisation; ils sont souvent cadrés dans un contexte technique et sont plus au moins connus au début du projet. Dans le cadre d'un SIG 3D collaboratif, le Schéma Directeur intervient comme une forme de synthèse et de mise au point sur les objectifs définis dans les phases précédentes, qui ont fait l'objet de consentement entre les parties. En résumé, le Schéma Directeur permet de recentrer sur les objectifs définis préalablement et étudier les contraintes en vue de retenir ceux les plus réalistes. Les objectifs du Schéma Directeur se résument en:

- la définition des orientations stratégiques du SIG 3D collaboratif: fonctionnalités, applications, modèle 3D, etc.
- l'étude des contraintes organisationnelles: les ressources humaines et matérielles, les compétences, le niveau de maturité des systèmes existants,...
- l'estimation globale des écarts entre le futur système et l'état de l'existant.

L'étude n'est pas censée être exhaustive. Elle peut être réalisée à travers la matrice de conduite de projet en projetant les classes *Données* et *Interopérabilité* sur les niveaux: *Descriptif/Analytique*, *Technique* et *Organisationnel* avec des poids différents en termes de la consistance de l'analyse (*Fig4.11*). Les contraintes organisationnelles doivent être étudiées selon une vision d'ensemble sur toutes les organisations "confondues". L'étude vise

à répondre à la question: «Est-ce que les ressources matérielles et humaines de l'ensemble des organisations sont suffisantes pour atteindre les objectifs stratégiques du projet?»

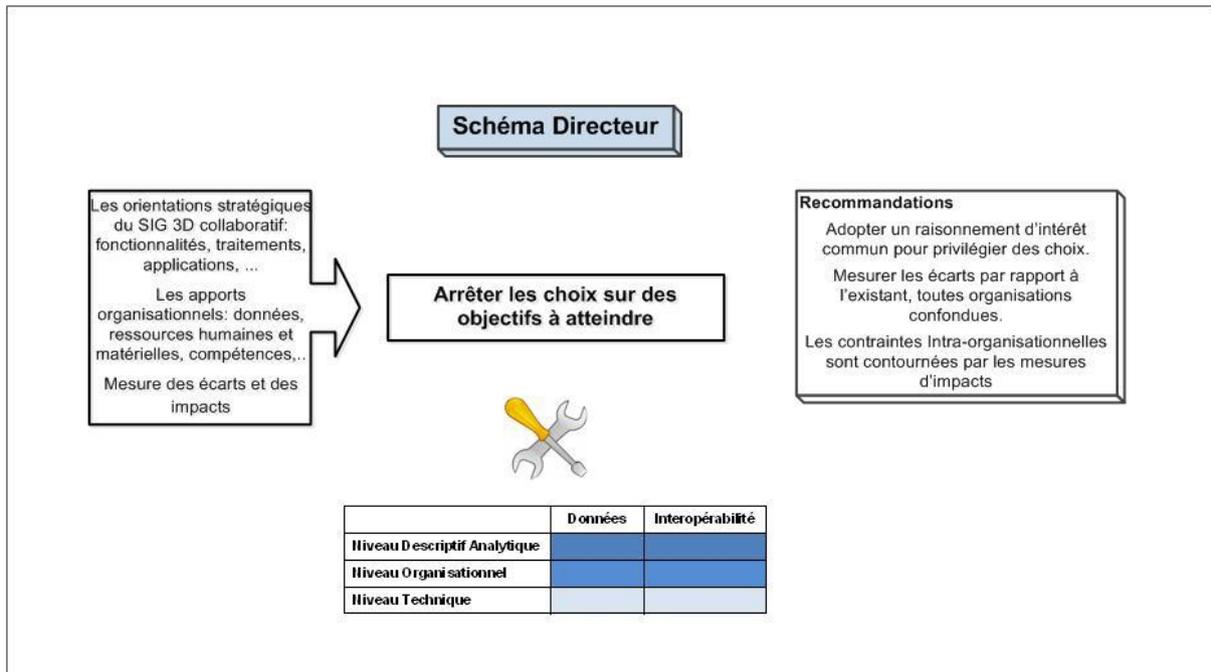


Fig4. 11. Le Schéma Directeur

4.5.4.2 L'Etude de Faisabilité

Pour valider les orientations du Schéma Directeur, une étude de faisabilité générale est requise pour mesurer les avantages et les inconvénients du projet. Cette phase peut être sollicitée à différents niveaux de la démarche pour évaluer les solutions conceptuelles des étapes précédentes. On distingue donc une étude de faisabilité globale qui doit porter sur toutes les classes et tous les niveaux, et des études de faisabilité ponctuelles qui sont recommandées pour cibler certaines classes ou niveaux ayant fait l'objet de conceptions. A ce niveau, il faut étudier la composante technique, la composante économique et la composante fonctionnelle du projet. Cette phase dépasse les compétences des partenaires et il est préférable, voire primordial de la confier à un expert. L'avantage serait aussi de s'affranchir des contraintes individuelles et de sauvegarder l'aspect collaboratif (Fig4. 12).

4.5.4.3 L'Etude Analytique

L'étude analytique doit être réalisée selon le niveau Descriptif/Analytique. L'aspect descriptif porte sur un diagnostic de l'existant (Ce qui existe), alors que l'aspect analytique permet d'analyser l'existant au regard des spécifications du nouveau système (Ce qui doit être). Les deux classes «Données» et «Interopérabilité» sont examinées pour avancer des réflexions sur la conception et le reengineering. Nous présentons dans les figures (4.13) et (4.14) les questions fondamentales qui sont soulevées dans le cadre de la description et de l'analyse de l'existant.

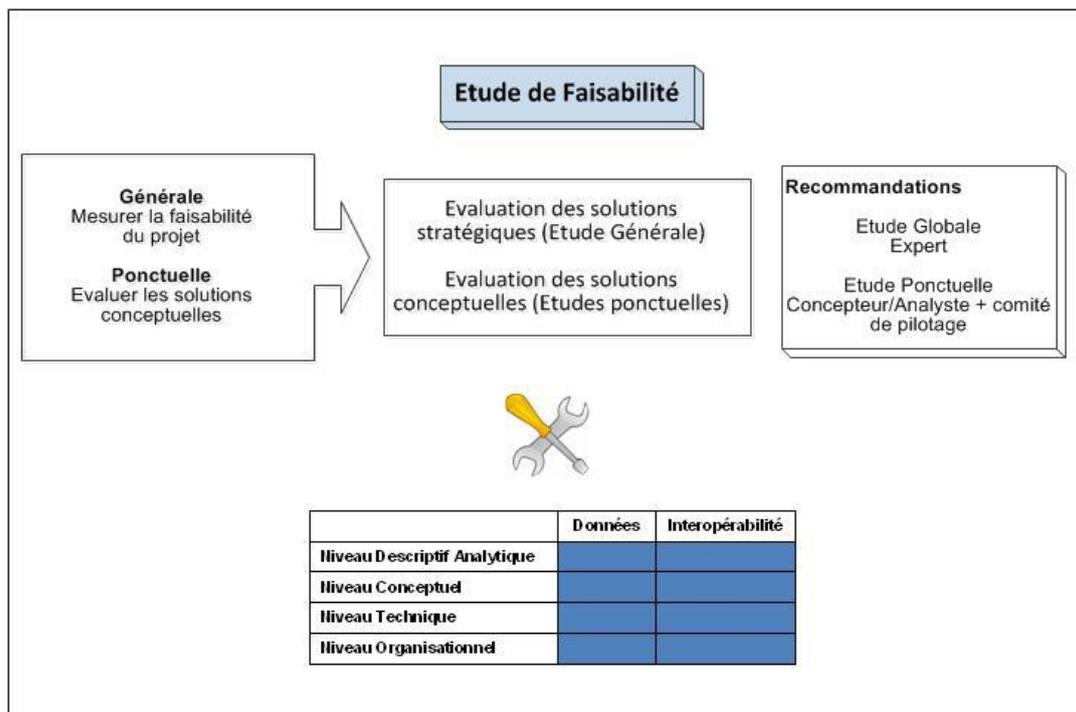


Fig4. 12. L'Etude de Faisabilité

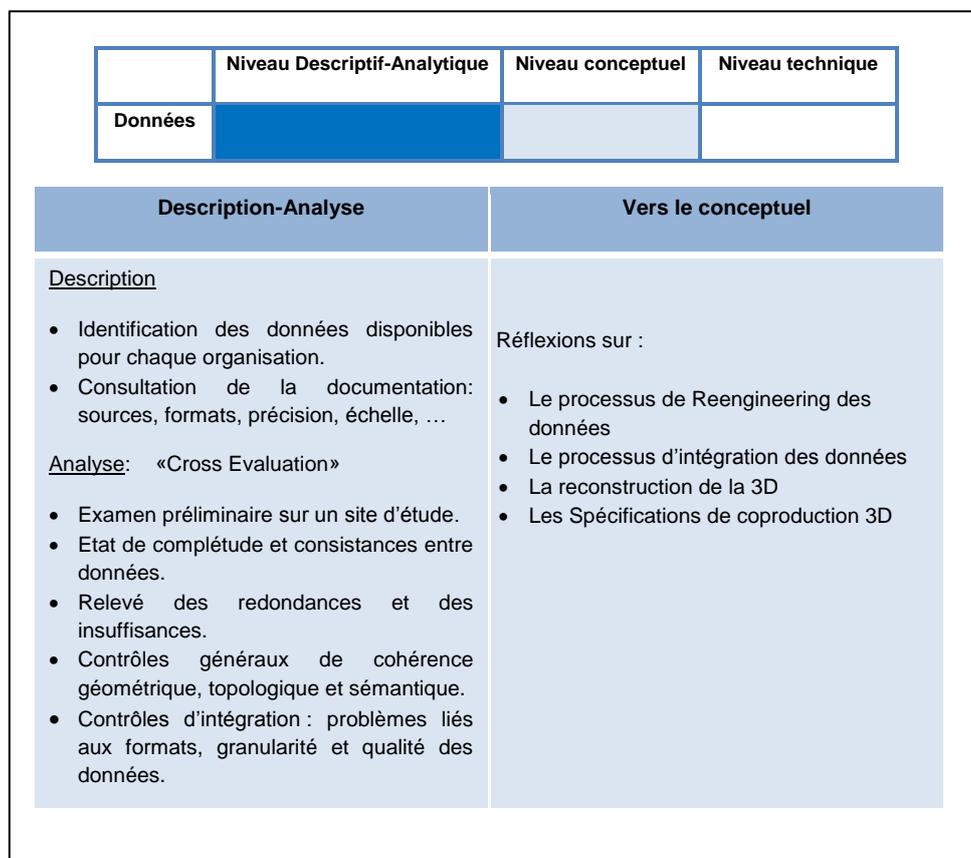


Fig4. 13. Etude analytique sur la classe «Données»

	Niveau Descriptif-Analytique	Niveau conceptuel	Niveau technique
Interopérabilité			
Description-Analyse		Vers le conceptuel	
Analyse de l'interopérabilité à deux niveaux : <ul style="list-style-type: none"> • Entre les schémas sources • Entre les schémas sources et le schéma du standard 3D adopté Analyse des écarts géométriques et sémantiques.		<ul style="list-style-type: none"> • Schématisation des processus de traduction entre les schémas source et cible. • Réflexion sur le schéma intermédiaire pour la future intégration des données. 	

Fig4. 14. Etude analytique sur la classe «*Interopérabilité*»

Synthèse

Il faut noter que les étapes précitées, relevant de la Co-Analyse peuvent être itératives et ne doivent pas forcément suivre l'ordre dans lequel nous les avons présentées. Il peut s'avérer utile de démarrer avec l'étude analytique avant d'arrêter les orientations du Schéma Directeur en vue de minimiser le retour sur la définition des objectifs.

Les étapes relevant de la Co-Analyse sont exécutées à des niveaux d'analyse différents pour mesurer la faisabilité des objectifs arrêtés et les réviser pour en maintenir les plus "sûrs", et aussi analyser l'existant en termes de données et prévoir des solutions de reengineering et d'intégration.

4.5.5 La Co-Réalisation

C'est une phase consistante du projet qui regroupe les étapes de conception et de mise en place du système. Dans cette phase, la conception est collaborative et prend les deux formes : « *Co-conception* » et « *Conception distribuée* » qui ont été définies précédemment et qui doivent être entreprises dans un cadre d'interactions efficace permettant au concepteur de piloter les processus de modélisation du système et aux acteurs de concevoir les processus de reengineering adaptés à leurs contextes. Les résultats doivent être communiqués au sein du comité de pilotage pour favoriser l'apprentissage collectif et l'échange du savoir-faire. A ce stade, le recours aux techniques informatiques du Groupware est incontournable.

Les solutions conceptuelles concernent le SIG 3D en tant que "SIG" ainsi que les processus de reengineering et d'intégration des données existantes qui ont fait l'objet de l'étude analytique. Une étape de Projet Pilote peut être programmée pour tester et valider les solutions conceptuelles. Suite aux résultats du projet pilote, le retour sur certaines étapes peut être requis pour y apporter des modifications. Le travail de conception peut être ainsi scindé en deux étapes: «*l'Etude Conceptuelle*» et la «*Conception*» proprement dite avec le projet pilote comme étape intermédiaire (*Fig4. 15*).

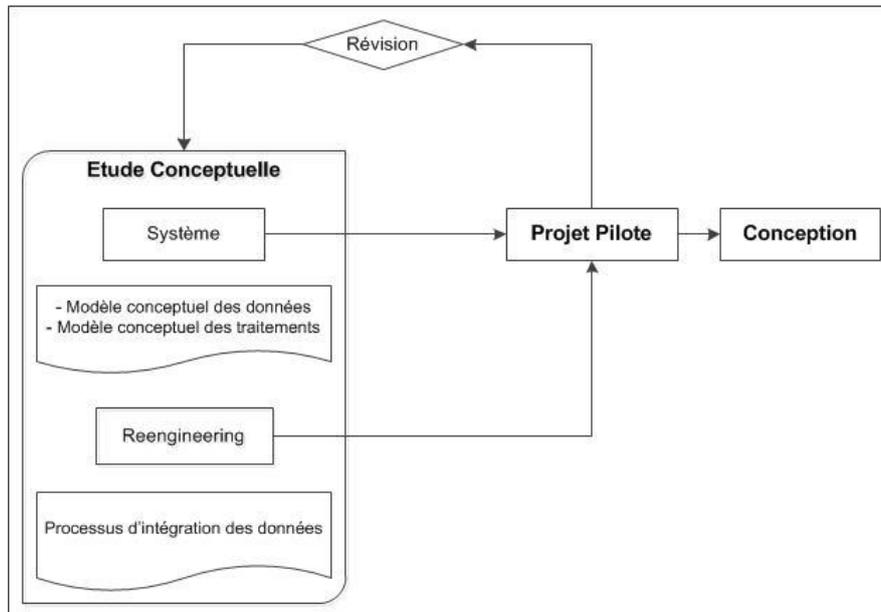


Fig4. 15. Etude conceptuelle et Conception avec Projet Pilote

4.5.5.1 L'Etude conceptuelle

L'étude conceptuelle est une étape de proposition de solutions conceptuelles sur base de l'étude analytique et des besoins formulés dans les étapes précédentes. L'étude ne se réduit pas aux modèles d'implantation de la base de données mais propose des solutions pour le reengineering des données et leur intégration. Cette étude porte sur le *Niveau Conceptuel* et peut être scindée en deux étapes: «*Etude Conceptuelle-Système*» et «*Etude Conceptuelle-Reengineering*».

L'étude Conceptuelle-Système est l'étape de proposition des composantes du SIG 3D en termes de modèle de base de données et de traitements y associés. La phase de modélisation conceptuelle du SIG 3D permet de répondre à deux questions fondamentales: quels sont les aspects de la réalité (objets et relations) à représenter? Et comme ils seront représentés dans le modèle? Dans les SIG, la modélisation conceptuelle porte sur les données géométriques et topologiques ainsi que les données attributaires. Les données attributaires représentent les caractéristiques associées aux données géométriques. Ces données sont difficiles à concevoir dans la phase de conception d'un SIG parce qu'elles dépendent des usages et sont fortement liées aux applications. Elles sont généralement créées manuellement en fonction du besoin et peuvent toujours évoluer dans des contextes différents.

L'étude Conceptuelle-Reengineering a pour objectif de concevoir des solutions pour le reengineering des données et les processus de leur intégration dans la base de données 3D collaborative. Cette étape exploite les résultats de l'étude Conceptuelle-Système qui définit les spécifications pour le modèle 3D collaboratif et ceux de l'étude analytique sur les données disponibles.

L'étude Conceptuelle peut porter, en partie, sur le « Niveau Technique » pour guider les solutions conceptuelles. Certes, le travail de conception doit être indépendant de toute considération technique, mais il s'avère que dans certaines situations, des choix techniques

préalables sont parfois justifiés par des contraintes de coût ou de conformité entre les composantes du système (Hajji et Billen, 2012) et influencent ainsi les choix conceptuels.

4.5.5.2 Le Projet Pilote

Le projet pilote est une étape de test des solutions conceptuelles proposées dans les étapes précédentes. Il permet également d'évaluer le coût global du projet. Le Projet Pilote peut porter, selon le besoin, sur plusieurs classes et plusieurs niveaux de la MCP. Il peut s'imposer à plusieurs reprises dans la démarche pour prise de décision sur les solutions conceptuelles (Fig4.16).

Une part importante du travail dans le SIG 3D collaboratif est centrée sur les données en vue de les intégrer dans la base de données collaborative. Celles-ci sont hétérogènes, incomplètes et présentent des imperfections. Il en sort que le processus de reengineering et d'intégration n'est pas unique. Il dépend de l'état des bases de données de chaque organisation. Ainsi, le pilotage des processus d'intégration nécessite l'élaboration d'un projet pilote sur une zone restreinte afin de tester les solutions conceptuelles et techniques et établir des recommandations pour les étapes futures. Le choix de la zone du projet pilote doit être bien étudié pour englober tous les cas possibles pouvant engendrer des conflits entre les données. Nous allons illustrer cette étape à travers un cas d'étude en région wallonne que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

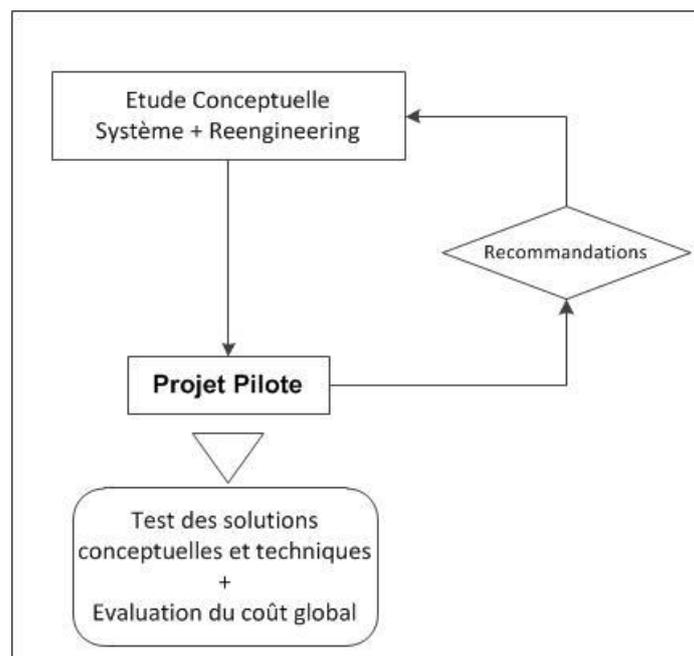


Fig4. 16. Le Projet Pilote

4.5.5.3 La Conception

C'est l'étape de traduction des solutions conceptuelles par l'établissement des modèles des données pour la base de données 3D collaborative en utilisant des formalismes comme UML, ainsi que les workflows modélisant les processus de reengineering et d'intégration des données. La figure 4.17 récapitule les étapes relevant du travail conceptuel.

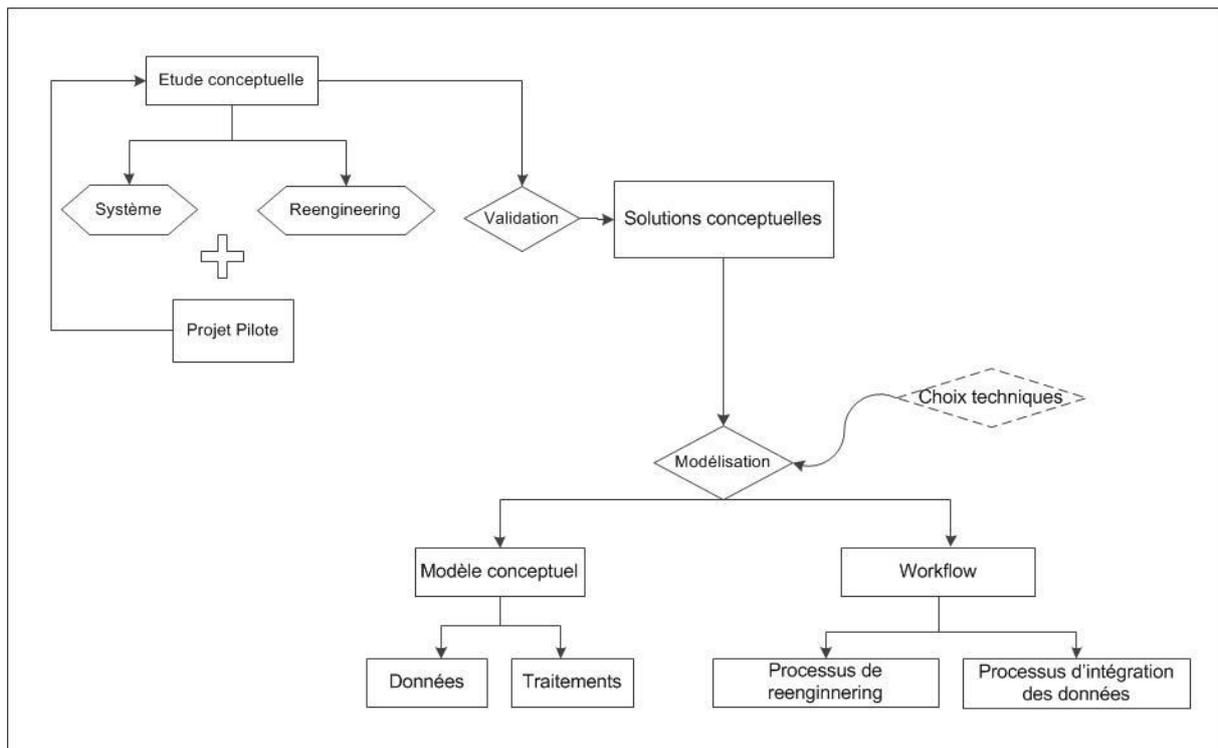


Fig4. 17. La conception

4.5.5.4 L'Étude technique

Dans l'étude technique, il s'agit de faire des choix sur les solutions techniques à adopter pour la mise en place de l'ensemble du système. Cette étude peut faire référence à des architectures technologiques de projets similaires ou faire appel à une étude de Benchmark (Fig4.18) pour évaluer les solutions existantes sur le marché, face aux solutions conceptuelles préétablies. Selon le besoin, les outils techniques utilisés dans le cadre du projet pilote peuvent être maintenus en vue de réduire le coût inhérent au Benchmark.

En fonction de l'architecture technique choisie, les solutions conceptuelles sont traduites en langage physique, les interfaces graphiques ainsi que les processus techniques de reengineering et d'intégration des données sont programmés (Fig4.19). Dans l'étude technique, on distingue deux types d'outils: des outils qui seront maintenus pour le système comme le logiciel SIG3D et le SGBD ainsi que des outils qualifiés de "jetables" et qui servent à accomplir des tâches ponctuelles comme la traduction de formats, les transformations de systèmes de coordonnées, etc.

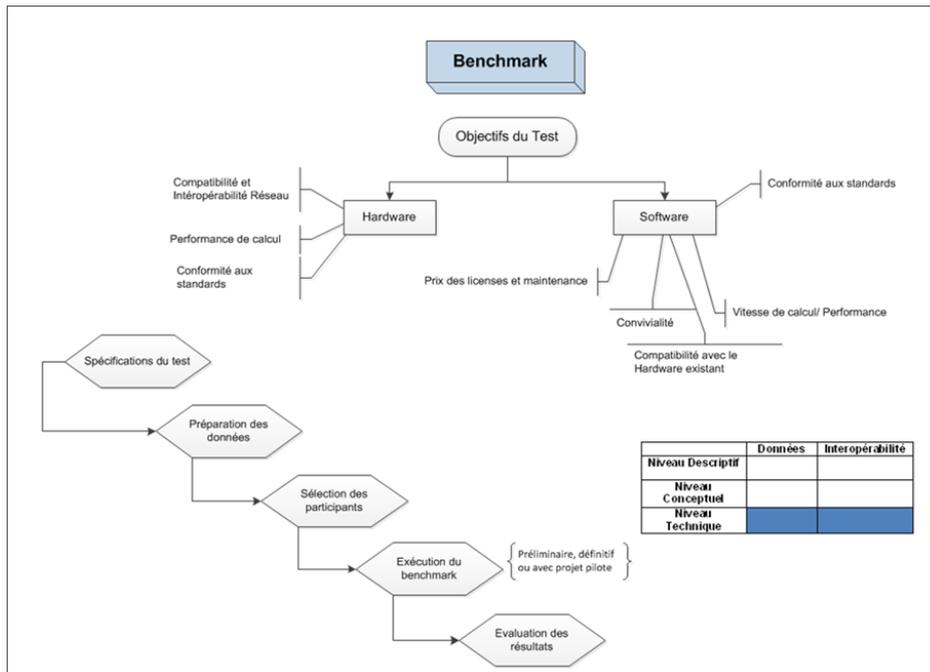


Fig4. 18. Le Benchmark

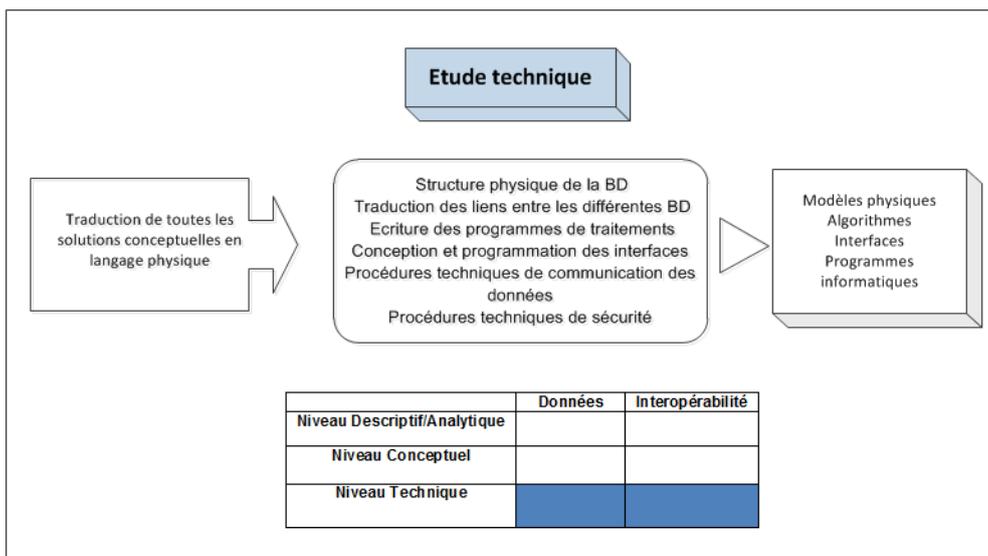


Fig4. 19. L'Etude technique

4.5.6 L'Implantation et la mise en service

C'est l'étape d'installation du système et sa mise en service. Elle comporte principalement les tâches suivantes :

- Production des parties du système selon l'étude technique.
- Saisie, acquisition, chargement des données.
- Installation des ressources de communication.
- Préparation de l'ensemble du contexte SIG pour mise en service.
- Choix du scénario de mise en service selon la conception faite pour l'architecture du système.

- Résolution des problèmes techniques.
- Formation du personnel.

4.5.7 La Co-Evaluation

L'évaluation d'un SIG 3D collaboratif est un sujet qui dépasse le contexte de la présente recherche. Nous tentons ici de présenter, sans chercher l'exhaustivité, des concepts généraux autour de l'évaluation d'un projet SIG 3D collaboratif en s'inspirant de quelques principes figurant dans la littérature.

Dans le domaine des Systèmes d'Information (SI), l'évaluation est définie comme: «*Un processus référé à la détermination quantitative et/ou qualitative de la valeur ou du niveau des bénéfices associés à investir dans une technologie de l'information pour une organisation*» (Doherty et King, 2004; Willcocks, 1992). Dans notre contexte collaboratif, l'évaluation cible l'organisation «abstraite» et tient compte de la valeur ajoutée du projet pour la communauté des acteurs impliqués. A cet égard, nous adoptons le terme de «Co-Evaluation».

Dans la littérature, l'évaluation a été étudiée dans le champ des SI, des SIG et des IDS. Cependant, on note l'absence d'un cadre théorique prêt à l'emploi pour l'évaluation des SIG (Noucher et Archias, 2007) et aussi d'une procédure formelle d'évaluation des IDS (Rodriguez-Pabon, 2005). La complexité de l'évaluation vient du fait qu'elle doit prendre en considération les différents contextes dans lesquels sont ancrées les solutions (Rodriguez-Pabon, 2005). Dans le cadre de l'évaluation des SIG, Pinto et Onsrud (1997) (cités par Noucher et Archias, 2007) proposent trois critères qui sont : la validité technique des outils, la validité organisationnelle qui évalue le degré d'acceptation des outils par les utilisateurs et l'efficacité organisationnelle des outils en termes de leur capacité à produire du changement dans l'organisation. Noucher et Archias (2007) se sont alignés sur ces critères pour évaluer les IDS en proposant les trois concepts: Performance, Utilisation et Utilité. Rodriguez-Pabon (2005) soulève trois questions fondamentales autour de l'évaluation que nous adoptons pour illustrer le cadre d'évaluation d'un SIG 3D collaboratif (Fig4.20).



Fig4. 20. Questions autour de l'évaluation

Dans le cycle de vie d'un SIG, l'évaluation peut se positionner soit au début du projet pour justifier les investissements et légitimer le choix de la solution en démontrant les bénéfices (évaluation "*Ex ante*"), ou bien après l'installation du système pour démontrer dans quelle mesure les solutions ayant été adoptées atteignent les résultats et les objectifs escomptés (évaluation « *Ex post* »). Pour un SIG 3D collaboratif, l'évaluation « *Ex ante* » revêt une grande importance, vu le caractère novateur de la solution. Elle est vue comme une démonstration de faisabilité du projet. Son objectif n'est pas d'imposer une forme de solution mais plutôt d'obtenir un consensus, au niveau stratégique, sur le type et l'étendue de la solution à entreprendre. L'évaluation « *Ex post* » du SIG 3D collaboratif ne peut pas être ponctuelle mais demande un processus continu pour pouvoir mesurer, dans le temps, l'impact du projet sur le travail inter organisationnel. Elle vise aussi à ressortir des propositions pour améliorer les solutions dans le futur.

L'évaluation peut s'articuler autour de trois éléments: le produit, le processus et l'organisation (Saleh et Alshawi, 2005) (cité par Rodriguez-Pabon, 2005). L'évaluation du SIG 3D collaboratif en tant que produit concerne sa qualité et aussi le degré de satisfaction de ses utilisateurs en termes d'apport technologique par rapport aux systèmes existants. L'évaluation orientée processus permet d'évaluer la performance du processus du développement du SIG 3D et des démarches de conduite du travail collaboratif. Par rapport à l'organisation, l'évaluation permet de mesurer le type de gestion fonctionnelle et la perception du système par les organisations, mais en valorisant l'impact sur les processus inter organisationnels.

L'évaluation peut être quantitative ou qualitative. L'évaluation quantitative calcule le rapport coût/bénéfice tandis que l'évaluation qualitative considère le degré de satisfaction des utilisateurs et les analyses d'écarts (Watson et al. 1998). A notre vue, l'évaluation quantitative est difficile à entreprendre et ne peut pas refléter la valeur réelle du projet vu que les objectifs prennent plusieurs dimensions différentes et les bénéfices sont étendus, ce que Rodriguez-Pabon (2005) appelle la valeur extrinsèque du projet en référant au cadre des IDS.

Dans les approches d'évaluation (*Fig4.21*), la plupart des études relatives s'étale sur les zones de l'efficience et de l'efficacité. Ces études concernent largement les aspects technologiques, financiers et un peu moins organisationnels des projets SI. De ce fait, elles négligent très largement les aspects interprétatifs, contextuels et sociaux de l'évaluation, qui seraient reliés à la zone de la compréhension (Serafeimidis et Smithson, 2003).

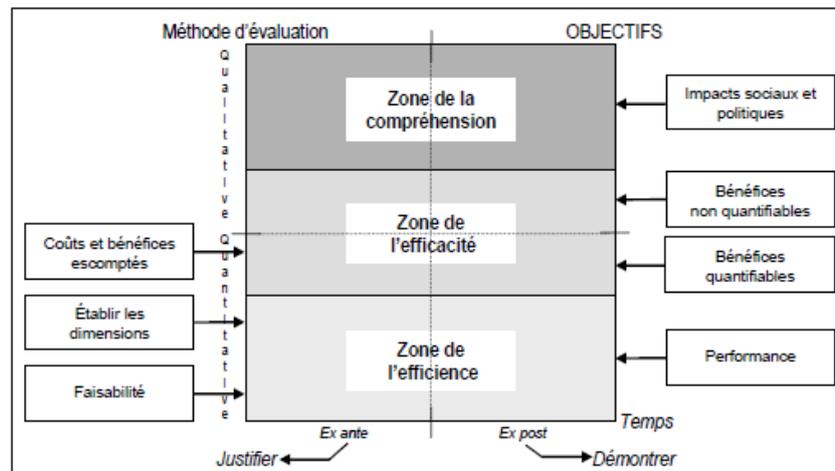


Fig4. 21. Les approches d'évaluation

Dans le même contexte, Noucher et Archias (2007) soulèvent les lacunes en termes d'évaluation organisationnelle des dispositifs partenariaux émergents dans le cadre d'IDS et considèrent que les partenariats et les communautés de pratique doivent être également pris en compte dans les méthodes d'évaluation. Fontaine et Millen (2004) regroupent sous trois rubriques l'impact des communautés de pratiques: les bénéfices pour l'individu; pour la communauté et pour l'organisation. Noucher et Archias, (2007) y ajoutent les bénéfices pour les organisations (mutualisation des moyens et des savoirs) et des bénéfices pour le territoire. Le SIG 3D collaboratif, de par sa composante collaborative, exige notamment ce type d'évaluation adressant l'impact de la solution sur les communautés collaboratives qui peuvent émerger et évoluer dans le cadre du projet.

Finalement, l'évaluation d'un SIG 3D collaboratif est une tâche loin d'être triviale et doit tenir compte de plusieurs aspects en considérant plusieurs critères: évaluation par rapport aux objectifs communs adoptés; par rapport aux attentes des organisations; par rapport aux systèmes existants, etc. Plusieurs formes d'évaluation peuvent être adoptées à savoir : des questionnaires, des enquêtes, des études de Benchmark, etc.

4.6 Conclusion

Dans un SIG 3D collaboratif, et d'ailleurs dans toute action collaborative, les objectifs sont stratégiques et les apports du système ne sont pas facilement observables au début du projet. Il faut donc disposer d'outils efficaces pour démontrer que le SIG 3D collaboratif ne se limite pas à une solution technique profitant de la flambée technologique, mais consiste en une véritable évolution organisationnelle, qui va constituer une brique fondamentale pour d'autres formes d'échange et de partenariat autour de l'information géographique.

Le SIG 3D collaboratif est une solution novatrice. Sa mise en œuvre doit tenir compte de cet aspect pour faciliter son acceptation et garantir sa réussite. Dans le contexte de la géomatique, bon nombre d'auteurs ont déjà reconnu, accepté et adopté le paradigme de la diffusion de Rogers. Le paradigme a été très utile pour expliquer le processus d'implantation et d'adoption des SIG dans les contextes organisationnels (Rodriguez-Pabon, 2005). Selon ce paradigme, l'innovation possède cinq caractéristiques pouvant influencer son degré d'acceptation: l'avantage relatif; la compatibilité; la complexité; l'expérimentabilité et l'observabilité (Rodriguez-Pabon, 2005). Le SIG 3D collaboratif doit être perçu par ses

utilisateurs potentiels comme solution apportant plusieurs avantages par rapport à leurs systèmes traditionnels, sans toutefois s'éloigner du cadre de leur connaissance et de leur culture professionnelle. Les utilisateurs doivent disposer d'outils pour expérimenter cette solution novatrice et ne doivent pas percevoir sa complexité.

Les impacts du SIG 3D collaboratif sont multiples. Ils sont loin de se réduire à l'architecture technologique du SIG 3D, mais permettent de faire bénéficier l'ensemble des acteurs au niveau individuel, organisationnel et social, raison pour laquelle l'évaluation du projet revêt une grande complexité due à la difficulté de cerner les critères d'évaluation et les mesurer.

Dans ce chapitre, nous avons cerné la question conceptuelle sur la mise en place d'un SIG 3D collaboratif en proposant une démarche méthodologique générique et ouverte qui peut servir comme support pour conduire le projet. Certes, notre recherche vise les SIG 3D collaboratifs mais la démarche garde un aspect générique applicable aux SIG collaboratifs en général. Aussi, la plupart des questions abordées sont d'utilité pour toute action collaborative centrée sur les données spatiales. La composante technique, ayant une part non négligeable dans le projet, fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE5. LE SIG 3D COLLABORATIF: ASPECTS TECHNIQUES

5.1 Introduction

Les questions techniques relatives à une approche SIG 3D collaborative sont multiples. La collaboration engendre des processus de reengineering des bases de données, de modélisation, d'intégration et de choix d'architecture technologique et de mécanismes d'appropriation collective du système, ainsi que de maintenance et de mise à jour collaborative. Les informations provenant des différents partenaires sont réparties et souvent incomplètes mais leur fédération dans un système collaboratif permet de leur confier une valeur ajoutée, et aussi de s'affranchir du coût inhérent à l'acquisition de nouvelles données, qui a été avancé parmi les arguments potentiels justifiant l'intérêt de l'engagement dans une action de collaboration. Des processus d'intégration d'information sont requis. Ceux-ci, sont jusqu'à maintenant un domaine de recherche encore actif vu la diversité des contextes et des cas d'applications.

Le présent chapitre focalise sur les principaux aspects techniques liés à l'intégration des informations multi sources dans une base de données 3D collaborative, à travers des tests sur différentes techniques mises en jeu pour répondre à ce besoin. L'expérimentation est réalisée dans le cadre d'un projet pilote utilisant trois jeux de données fournis par des organismes producteurs de données géographiques, en région wallonne: l'Institut Géographique National, le Service Public de Wallonie et l'Administration Générale de la Documentation Patrimoniale. Après une brève introduction des questions techniques, nous présentons le projet en deux grandes étapes: la première étape est une étude analytique de l'existant en termes de données, de besoins et de spécifications requises pour interopérabilité. Nous présentons à la lumière de cette analyse une proposition de modèle 3D collaboratif pour l'objet bâtiment. Dans la deuxième étape, nous présentons le processus d'intégration des bases de données sources vers la base de données 3D collaborative établie sur base du modèle proposé dans l'étape précédente.

5.2 Les aspects techniques

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé la question de la stratégie de développement d'un SIG 3D collaboratif selon une démarche évolutive en considérant deux niveaux de développement de la solution: un «niveau d'implantation» qui consiste à réutiliser les données déjà disponibles dans les organisations en leur appliquant un processus d'intégration, et un «niveau d'évolution» qui prévoit l'ajout d'autres flux d'informations dans le futur par coproduction de données 3D et par intégration d'autres sources externes. Nous nous limitons ici à l'étude des questions techniques autour de la version d'implantation du SIG 3D collaboratif. La version d'évolution sera présentée plus loin dans ce document, en tant que perspective de recherche.

Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents, un projet SIG 3D collaboratif comporte plusieurs dimensions à gérer conjointement dans le cursus de sa conception et de sa mise en place. La dimension technique, entre autres, implique un travail collaboratif considérable. La première question est celle de l'interopérabilité technique et sémantique entre les composantes du système. Le référentiel collaboratif 3D définit le cadre de référence

requis pour assurer cette interopérabilité à travers un accord sur le standard de modélisation 3D et sur une ontologie de domaine définissant un cadre sémantique commun. L'architecture technique d'un SIG 3D doit ainsi s'articuler autour de ce référentiel par le choix d'un éventail d'outils (SIG logiciel, SGBD, outils d'import, de visualisation, etc.) qui soient compatibles et interopérables avec le standard 3D adopté. La deuxième question est centrée sur les données. Celles-ci engendrent des coûts d'acquisition importants qu'il faut pouvoir minimiser ou partager par collaboration. Les informations réparties entre différentes bases de données et qui concernent le même site géographique, à différentes échelles de représentations doivent être fédérées à travers un processus d'appariement et d'intégration.

La base de données collaborative requiert la définition d'une stratégie de mise à jour. Un processus de propagation des mises à jour doit être conçu pour mettre à jour la base de données collaborative en fonction des évolutions des bases de données des différents partenaires. Un processus d'appariement doit être conçu pour répondre à ce besoin. Pour atténuer la complexité de la tâche, il est recommandé de mettre en œuvre un processus de mise à jour de la base la plus détaillée, puis les évolutions seront propagées sur la base de données collaborative. Nous précisons que cette question n'a pas été traitée dans le contexte de la présente recherche.

5.3 Le projet Pilote

5.3.1 Contexte et objectifs

Nous tenons à préciser que la mise en place d'un SIG 3D collaboratif ne peut pas faire l'objet d'une recherche individuelle. Elle requiert l'implication effective de tous les partenaires dans un cadre de travail collaboratif. Aussi, nous sommes conscients du fait que le projet nécessite une démonstration de faisabilité technique pour favoriser son acceptation. En effet, la mise en place d'un cadre pratique de collaboration autour des données est un bon catalyseur pour les motivations organisationnelles. Il permet d'instaurer une culture de collaboration, faire émerger de nouveaux besoins et des comités actifs qui peuvent s'organiser dans le futur en communautés de pratiques. Même si la collaboration ne se réduit pas au seul aspect technique, la soumission des données à un exercice de collaboration pratique peut dynamiser les relations inter organisationnelles et favoriser leur évolution vers des formes plus efficaces comme le SIG 3D collaboratif.

Vu que nous ne pouvons pas nous positionner dans le cadre pratique du projet en intégralité, nous avons orienté notre réflexion sur un de ses aspects techniques fondamentaux, celui qui consiste à concevoir un processus d'intégration des données multi source provenant de différentes organisations dans une base de données 3D collaborative. Notre objectif est de mettre en évidence, à travers un projet pilote, les problèmes techniques liés à la collaboration autour des données et la proposition de solutions pour les résoudre. En résumé, le projet pilote que nous présentons dans ce chapitre, s'articule autour de deux objectifs principaux :

- La proposition d'un modèle 3D collaboratif de bâtiment sur base de besoins prospectifs et qui respecte les spécifications du standard CityGML.
- La conception et la mise en œuvre d'un processus d'intégration des données existantes dans une base de données 3D collaborative compatible avec CityGML.

A travers cette expérimentation, nous testons des technologies 3D qui sont compatibles avec CityGML et nous démontrons la faisabilité technique d'un processus de collaboration autour des données. Notre objet d'intérêt est le bâtiment, qui représente une composante principale de l'espace urbain.

Les données qui ont fait l'objet de l'étude proviennent de trois organismes producteurs et gestionnaires d'information géographique sur le territoire wallon et qui sont : l'Institut Géographique National (IGN), le Service Public de la Wallonie (SPW) et l'Administration Générale de la Documentation Patrimoniale (AGDP). Les caractéristiques des données utilisées sont reportées dans le tableau 5.1 (*Tab5.1*)

Source	IGN	SPW	AGDP
Format	Geodatabase Esri	Fichiers Shape file	Fichiers Shape file
Géométrie	2.5D	2.5D	2D
Système de projection	Lambert 2008	Lambert 1972	Lambert 1972

Tab5. 1. Caractéristiques des données utilisées

5.3.2 Organigramme méthodologique

La première étape de notre démarche méthodologique concerne le modèle 3D collaboratif à établir pour le bâtiment et qui représente le noyau d'une future architecture SIG 3D. Notre proposition est faite sur base de besoins prospectifs. Elle prend compte des spécifications du standard CityGML, que nous adoptons comme point de départ pour notre modèle. La conception du modèle est réalisée indépendamment de l'étude analytique sur les données existantes. Ces dernières doivent, par contre subir un reengineering et une intégration dans la base de données 3D collaborative, une fois celle-ci est mise en place. Le processus d'intégration consiste en la définition des règles de traduction entre les schémas sources et le schéma cible du CityGML.

Notre étude porte sur des données multi sources. Un processus d'appariement des données et des schémas est utilisé pour la recherche des correspondances et la réconciliation (par sélection) des données en vue de sauvegarder la plus pertinente dans la base de données collaborative. La couche de données résultante de l'appariement et de la sélection est ensuite convertie selon le schéma du CityGML. Le processus consiste d'abord à reconstruire la géométrie 3D qui n'existe pas dans les bases de données sources et ensuite la traduire selon le schéma du CityGML.

En résumé, le processus d'intégration est réalisé en deux étapes :

1. Une intégration des bases de données source vers un schéma intégré, à travers:
 - un appariement des données et des schémas ;
 - une réconciliation des données par sélection.
2. Une traduction du schéma intégré vers le schéma cible, à travers :

- un reengineering des données: interpolation des hauteurs des bâtiments et reconstruction de la géométrie 3D ;
- un mapping entre le schéma intégré et le schéma cible du CityGML.

Dans la figure 5.1, nous présentons l'organigramme méthodologique adopté, dont les étapes seront expliquées dans les parties suivantes.

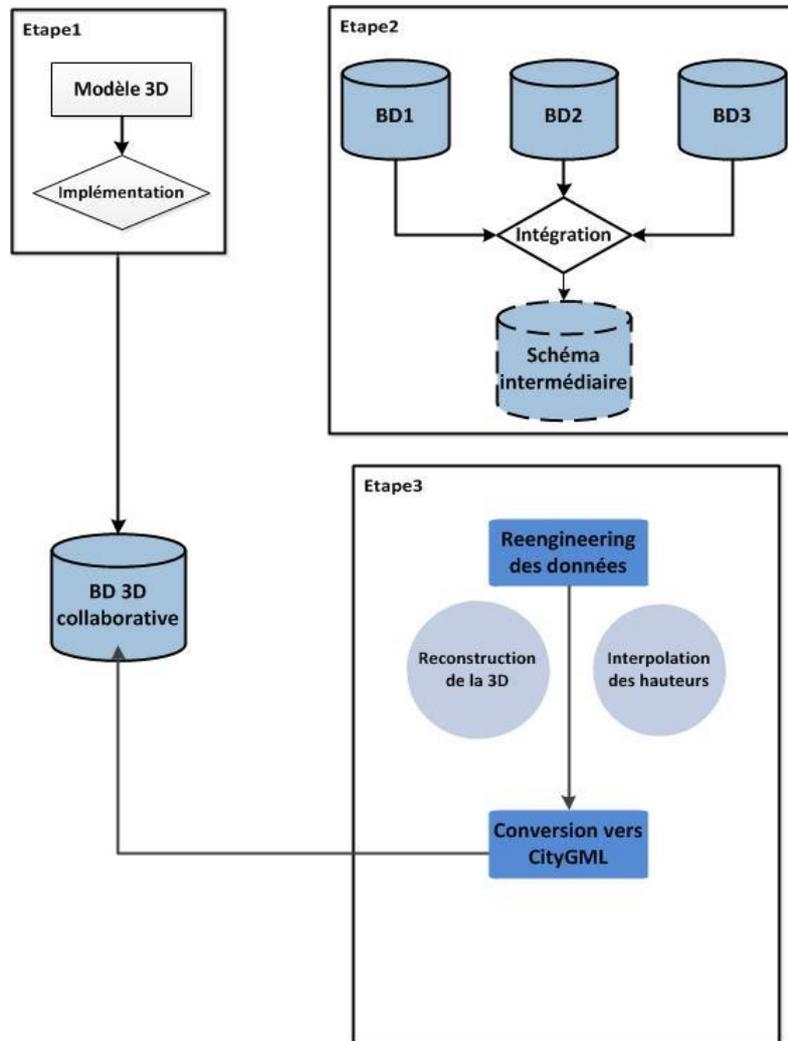


Fig5. 1. Les étapes de l'organigramme méthodologique

5.4 Le modèle 3D collaboratif

5.4.1 Introduction

L'objet «Bâtiment» représente une composante fondamentale de l'espace urbain. Dans la directive INSPIRE, le thème «Bâtiment» fait partie des données de référence qui sont requises dans l'infrastructure européenne des données. Il partage des relations avec les adresses, les parcelles cadastrales et le thème des noms géographiques. Le bâtiment représente un thème important pour les études environnementales. Selon la directive, la définition d'un bâtiment prend un sens très large: «*Les bâtiments sont des constructions en surface et/ou en souterrain qui sont utilisées pour abriter des humains, des animaux, des choses, de la production de marchandises ou des prestations de services et qui se réfèrent à*

n'importe quelle structure construite ou érigée de manière permanente sur son site». Faisant part importante des recommandations INSPIRE pour l'échange des données spatiales au niveau européen, le bâtiment suscite un grand intérêt auprès des organismes producteurs et gestionnaires des données de référence. Les sollicitations INSPIRE sur la représentation des bâtiments doivent être prises en charge. En Belgique, la directive a été transposée en lois nationales dans les trois Régions et au niveau fédéral.

Au niveau de la Belgique, la coopération entre les différents organismes producteurs et gestionnaires des référentiels géographiques trouve place dans plusieurs formes partenariales, allant de simples contrats d'échange de données, vers des projets ayant une dimension plus importante comme le projet "*BestAddress*", mis en place dans un cadre de collaboration entre les institutions fédérales, les régions et communes et dont l'objectif était de créer une source unique et authentique des adresses. Aussi, des actions de coopération centrées sur le bâtiment et la transposition de la directive INSPIRE sont en cours. Nous citons, dans ce cadre, le groupe de travail (GT) nommé "*Bâtiment-Inspire*" qui regroupe plusieurs institutions dont les trois régions (Région wallonne, Région de Bruxelles-Capitale, Région flamande), l'IGN, le SPW, l'AGDP, etc. Son objectif est de définir un modèle d'échange pour les bâtiments qui soit conforme à la directive INSPIRE.

Certes, des formes partenariales, des groupes de travail, des commissions, etc. sont mis en place, mais les objectifs visés sont ponctuels et ne se situent pas à un niveau stratégique. Il y a une grande duplication des efforts autour d'actions dispersées, avec absence d'une vision claire sur l'avenir de la gestion de l'information urbaine. Les visions des organismes sont ancrées dans leurs cultures professionnelles. Aussi, dans un temps où les utilisateurs expriment un véritable engouement envers la 3D, la prise en charge de la 3D ne semble pas faire une préoccupation majeure pour la plupart des organismes précités. Une solution prometteuse serait d'instaurer un cadre de collaboration efficace qui dépasse les cultures organisationnelles et les questions ponctuelles en abordant les principaux aspects autour de la représentation des données urbaines. Les visions doivent converger vers la conception d'un modèle 3D commun et interopérable et d'un référentiel collaboratif 3D tel que nous l'avons défini dans le chapitre précédent.

5.4.2 Les besoins

Sur base des besoins exprimés autour de la définition et la représentation des bâtiments dans le cadre de travaux en cours, notamment le GT "*Bâtiment-Inspire*", nous pouvons adopter des besoins prospectifs qui peuvent être vus comme une convergence des différentes visions et leur projection dans une solution future qui n'est pas encore visée par les partenaires, comme la représentation en 3D des bâtiments dans un modèle collaboratif. A travers notre participation à différentes réunions, dans le cadre ou en dehors du GT "*Bâtiment-Inspire*", nous avons pu soulever certains besoins qui ont été formulés par les différents organismes autour de l'objet «Bâtiment», à savoir:

- L'identification univoque de tout bâtiment situé en Belgique, à quelque stade que ce soit de son existence, pour mise en correspondance d'informations multi-sources.
- L'adoption d'un modèle conceptuel de données que les partenaires s'engagent à utiliser pour échanger leurs informations relatives aux bâtiments; celui-ci doit être conforme aux spécifications techniques imposées par la directive INSPIRE.

- La mise en place de sources authentiques des bâtiments : soit une seule source authentique centralisée soit des sources authentiques régionales assorties de processus d'échange et d'interconnexion.
- L'établissement des recommandations techniques pour l'acquisition et la tenue à jour de la géométrie d'un bâtiment d'une manière qui permette la meilleure cohérence entre les géométries saisies par différents acteurs: architectes ou urbanistes, géomètres, ingénieurs, cartographes, etc.
- L'optimisation de la mise à jour par les partenaires des représentations des bâtiments.

En ce qui concerne la représentation en 3D des bâtiments, les organismes se situent à des niveaux différents de réflexion et de réalisations. En effet, la région de Bruxelles est en cours de mise à jour de son système Urbis (*Brussels Urban Information System*) par l'ajout d'une couche 3D conforme à la norme CityGML. Au niveau du SPW, les travaux en cours sont plutôt orientés vers le reengineering du PICC (Projet Informatique de Cartographie Continue) et la réflexion sur les procédures de sa mise jour, un travail réalisé en collaboration avec l'unité de Géomatique de l'Université de Liège. L'IGN s'attribue, aujourd'hui un nouveau rôle: veiller à ce que l'information puisse être placée sur une référence géographique commune. Le rôle de producteur est aujourd'hui remis en question. L'IGN passe d'un rôle de fournisseur à celui d'«information broker», assurant l'accessibilité effective aux données géographiques et leur intégration pour aboutir à une infrastructure de données centralisée. Sa vision sur la 3D est projetée dans le futur; elle est tributaire de l'apport des différentes régions dans ce domaine. Il en résulte que des niveaux de maturité différents au niveau de la 3D entre les différents organismes mettent l'information 3D à un niveau secondaire. Celle-ci est vue comme une des représentations qui peut coexister avec les autres géométries 2D et elle est projetée dans le futur.

En résumé, les objectifs visés pour la représentation du bâtiment dans le cadre du groupe de travail "Bâtiment-Inspire" représentent des besoins réels mais qui sont surtout centrés sur l'aspect technique. L'établissement d'un modèle d'échange aura des impacts limités vu qu'il ne permet pas de résoudre les problèmes d'interopérabilité sémantique entre les schémas des bases de données et d'appropriation collective des données sur le bâtiment. Les problèmes inhérents à la traduction des formats seront toujours présents et feront une charge pour chaque organisme, sans que ceux-ci soient résolus dans un cadre d'apprentissage collectif. Le modèle doit être plutôt collaboratif et centré sur la modélisation et la coproduction future de la donnée 3D ainsi que l'adoption d'une stratégie coopérative d'intégration des données dans une structure commune, qui sera accessible à tous les partenaires. Le modèle 3D commun permettra de dépasser les divergences sémantiques et techniques à travers des spécifications communes que tous les partenaires s'engagent à respecter pour le reengineering de leurs bases de données et aussi pour la production de futures données.

5.4.3 La modélisation

5.4.3.1 Modélisation conceptuelle

Pour notre proposition de modèle 3D collaboratif de bâtiment, nous avons adopté le standard CityGML en tant qu'une recommandation INSPIRE pour la modélisation 3D et aussi pour ses potentialités que nous avons présentées dans le chapitre1 (*Partie 1.3*). Les difficultés de son

adoption (soulevées dans la partie 4.5.3.1) doivent être dépassées en orientant les réflexions vers les modalités de sa mise en pratique pour répondre aux besoins de modélisation, en optant pour une première version de modèle 3D basique, qui peut être enrichi dans le futur.

Le choix du niveau de détail pour une première version du modèle est contraint par la nature des données existantes qui sont essentiellement 2.5D. Ainsi, le Lod (du CityGML) pouvant être obtenu est le Lod1 (où les bâtiments sont représentés en blocs). Néanmoins, les données sources ne possèdent pas une géométrie 3D. La reconstruction de cette géométrie doit faire partie d'un travail de reengineering des données et de leur modélisation en 3D. Au-delà des spécifications définies pour le Lod1, il est possible lors de la modélisation 3D, de distinguer les différentes surfaces thématiques du bâtiment telles qu'elles sont définies dans le Lod2, à savoir les couches: «*Roof Surface*», «*Ground Surface*» et «*Wall Surface*». Cependant, le Lod2 ne peut pas être atteint vu que nous disposons d'aucune information sur le toit des bâtiments. La modélisation que nous proposons (toit plat avec distinction des surfaces thématiques) est une solution intermédiaire entre le Lod1 et le Lod2, que nous pouvons nommer "Lod1.5". Ainsi, deux géométries seront associées au bâtiment: une géométrie "Solid" représentant le bâtiment en cube et une géométrie "Multi Surface", où chaque bâtiment est représenté par ses différentes façades. Les géométries 3D seront construites à partir des données existantes via une modélisation 3D.

Au cours des travaux préparatoires du groupe "Bâtiment-Inspire", nous avons ressorti les besoins à considérer pour la modélisation attributaire des bâtiments, à savoir:

- **Identifiant du bâtiment:** avec spécification de la source, date de création et date de suppression de l'identifiant.
- **Statut du bâtiment:** correspond aux différents stades de la vie du bâtiment (en projet, en construction, en usage, en démolition, en ruines ...), date de début et date de fin de statut.
- **Catégorie du bâtiment:** source, date de début (validité de la catégorie) et date de fin (remplacement de la catégorie par une nouvelle).
- **Adresse du bâtiment:** à travers une connexion à la base de données des adresses.

L'identification unique d'un objet est d'une importance primordiale dans le cadre de la gestion interne d'une base de données géographique. En tant qu'objet de collaboration entre plusieurs organismes, un bâtiment doit être attribué une identité unique pour faciliter l'appariement, l'échange et la mise à jour. L'identification unique permet le passage d'une représentation cartographique à une représentation des données Orientée Objet. L'identifiant doit être catégorisé en fonction de la thématique à laquelle appartient l'objet référencé. Les identifiants sont limités aux objets de la réalité, dans la mesure où ils ne sont pas étendus aux primitives géométriques, par exemple. Le tableau 5.2 récapitule les propriétés associées à un identifiant unique.

Propriété	Définition
Responsabilité	L'identifiant unique est généré par le producteur responsable de la donnée.
Unicité	deux objets spatiaux distincts ne peuvent en aucun cas être porteurs du même identifiant. Toutefois, une copie d'un objet spatial aura le même identifiant que l'original puisqu'il identifie le même objet de la réalité.
Persistance	L'identifiant restera inchangé durant toute la vie d'un objet. Lorsque l'objet de la réalité disparaît et est remplacé par un nouveau, l'ancien identifiant ne peut pas être réutilisé. Il est détruit et un nouvel identifiant est créé.
Traçabilité	Un mécanisme est requis pour retrouver un objet sur la base de son identifiant.

Tab5. 2. Propriétés de l'identifiant unique (Mensuration Suisse)

La directive INSPIRE prévoit que l'utilisation d'identifiants uniques n'est nécessaire que pour les objets de référence. Par ailleurs, l'identifiant unique doit être composé de deux parties dont la première identifie la source de donnée au niveau national (ex : BE.SPW.PICC). Elle n'est pas laissée au choix du producteur de données. La seconde partie est laissée libre de construction. Afin de correspondre aux recommandations de la directive, il n'est pas nécessaire d'inclure le numéro de version de l'objet dans son identifiant. Celui-ci est représenté comme un attribut différent dans le modèle «*DataType*» Identifier (Fig5.2).

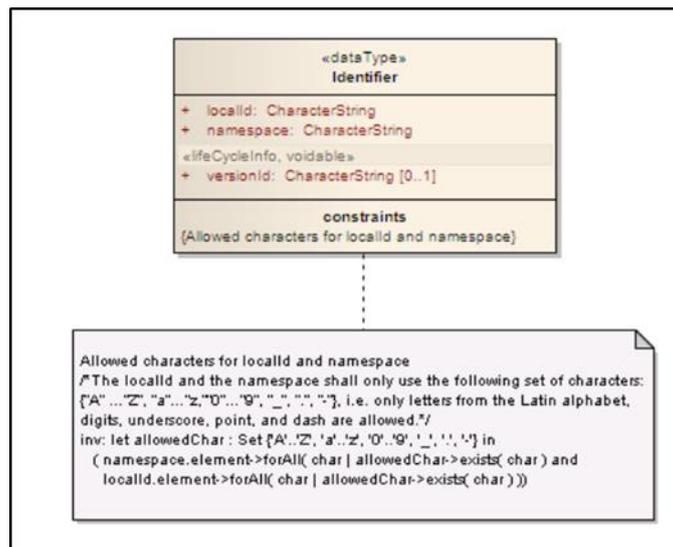


Fig5. 2. Generic Conceptual Model – Base Types (Extrait de la directive INSPIRE)

L'attribut «Catégorie du bâtiment» est équivalent à l'attribut «Building Nature» défini pour l'entité "Abstract Building" du schéma d'application d'INSPIRE (Fig5.3). Cet attribut est souvent exprimé en termes de fonction associée au bâtiment. Nous proposons de le modéliser par le nom «Fonction» qui est plus explicite et d'ajouter un attribut sur l'usage du bâtiment avec le nom «Usage». Nous conservons l'attribut «Statut du bâtiment» que nous jugeons utile pour la gestion de l'historique du bâtiment. Il est d'une importance primordiale dans les processus de propagation des mises à jour entre différentes bases de données.

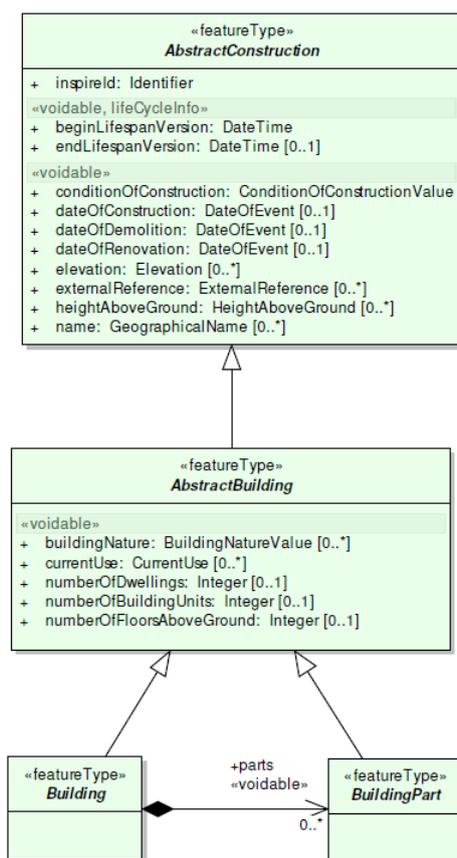


Fig5. 3. Schéma d'application du Bâtiment selon INSPIRE

A la lumière de l'analyse des éléments sur la modélisation conceptuelle des bâtiments portant sur l'aspect géométrique et attributaire, nous représentons dans la figure 5.4 notre proposition de modèle 3D collaboratif pour le bâtiment.

5.4.3.2 Modélisation Logico-Physique

Le choix d'un type de modélisation logique doit reposer sur plusieurs critères à savoir: le type de données spatiales, le type de requêtes à entreprendre, la prise en considération des avantages et des inconvénients de chaque modèle ainsi que la compatibilité avec le SGBD, dans le cas où celui-ci est choisi au préalable (Koussa, 2011). Certes, l'approche Objet est beaucoup plus naturelle pour une représentation liée à notre perception de l'espace, mais les SGBD relationnels paraissent incontournables vu leur performance dans les fonctions d'administration des données (Stoter, 2004). Il en sort que l'approche Objet Relationnelle, profitant des avantages des deux modèles Objet et Relationnel, offre un avantage majeur. En outre, le modèle Objet Relationnel est implémenté par les SGBD PostgreSQL et Oracle Spatial qui comptent parmi les SGBD les plus connus sur le marché. Le tableau 5.3 présente les différents critères de choix pour le modèle logique, projetés sur les trois modèles: Relationnel, Orienté Objet ou Objet Relationnel.

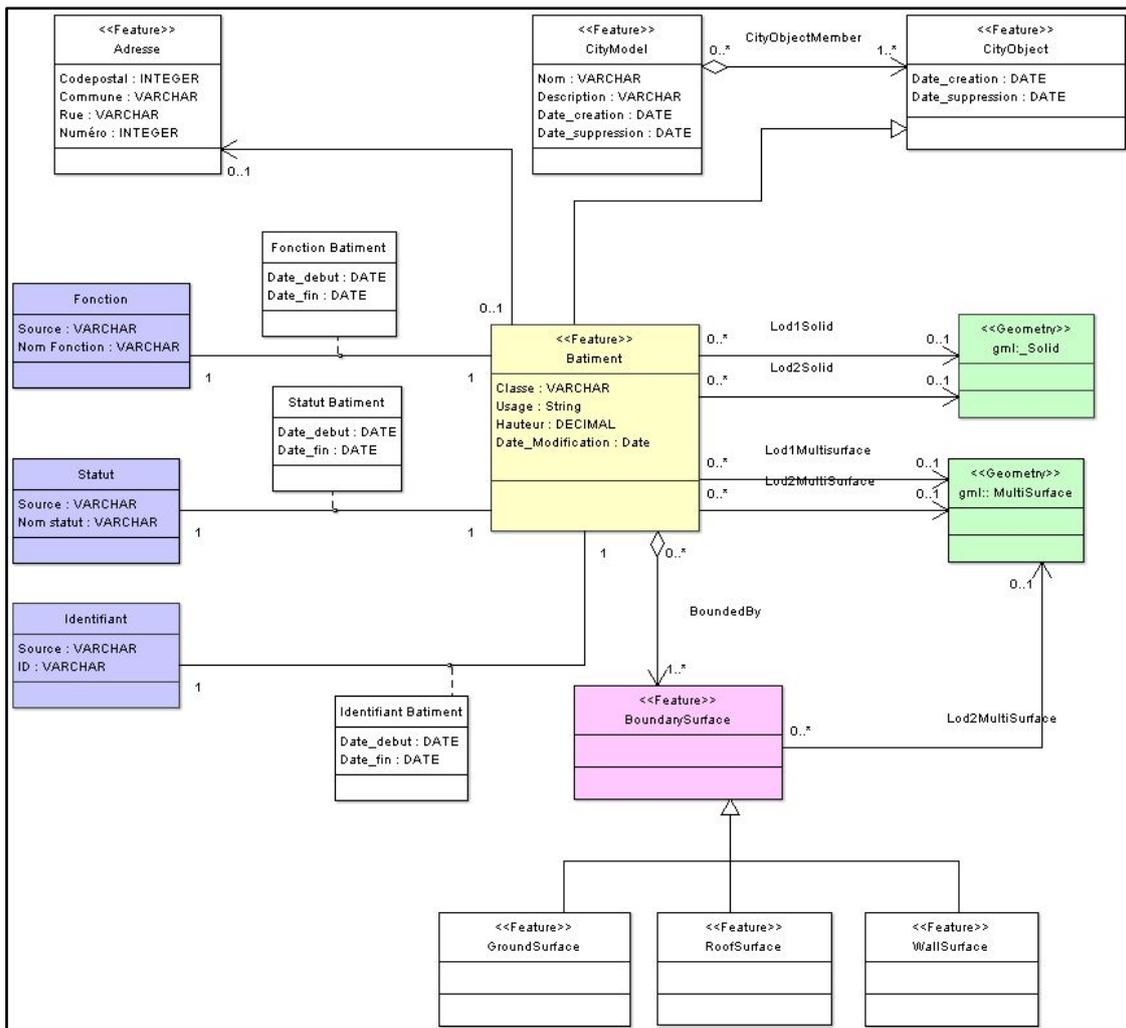


Fig5. 4. Le MCD du modèle 3D collaboratif pour le bâtiment

Le modèle logique est traduit en un ensemble de tables physiques selon le SGBD choisi. Plusieurs critères peuvent être considérés pour le choix d'un SGBD dont les plus importants sont: la prise en charge des données 3D, la compatibilité avec le standard adopté, le niveau d'usage, la performance et le coût. Parmi les SGBD les plus connus sur le marché: PostgreSQL avec sa cartouche spatiale PostGIS, Oracle Spatial et MySQL. Ces trois SGBD ont été comparés par Koussa (2011) (Tab5.4)

Modèle logique Critère de choix	Relationnel	Objet	Objet Relationnel
Données spatiales	-Représentation des objets spatiaux à travers des tables reliées -Séparation entre données et traitements	Représentation des objets spatiaux à travers des tables décrivant leurs propriétés ainsi que les traitements associés.	Reprendre le modèle relationnel en ajoutant quelques notions qui comblent ses lacunes
Requêtes spatiales	(+) Requêtes s'appuyant sur le standard SQL, disponible sur la plupart des SGBD	(-) OQL (Object Query Langage) disponible sur quelques SGBD, structures complexes, la hiérarchie de généralisation/spécialisation, les méthodes, etc.	(+) SQL3 intègre quelques notions objet
SGBD spatiaux	Oracle, PostreSQL, MySQL, SQLite, Ingres, Sybase, Access, etc	O2, GemStone, Orion, Gbase, ObjectStore, etc.	Oracle, PostgreSQL, Informix, etc.
Avantages/ inconvénients	(+) Fondements mathématiques, plus intuitif, plusieurs utilisateurs sont familiarisés avec SQL, grande diffusion dans les SGBD, etc (-) Non gestion d'objets complexes, normalisation pouvant augmenter le nombre de jointures, etc	(+) L'unité entre données et traitements, structures complexes, héritage, appariement entre modèle et objets modélisés, etc. (-) Interrogation, les traitements sur les objets définis une fois pour toute, etc.	(+) Reprend tous les concepts du relationnel et adoption des concepts objet (-) Manipulation d'objets parfois compliquée

Tab5. 3. Comparaison entre les différents modèles logiques (Koussa, 2011)

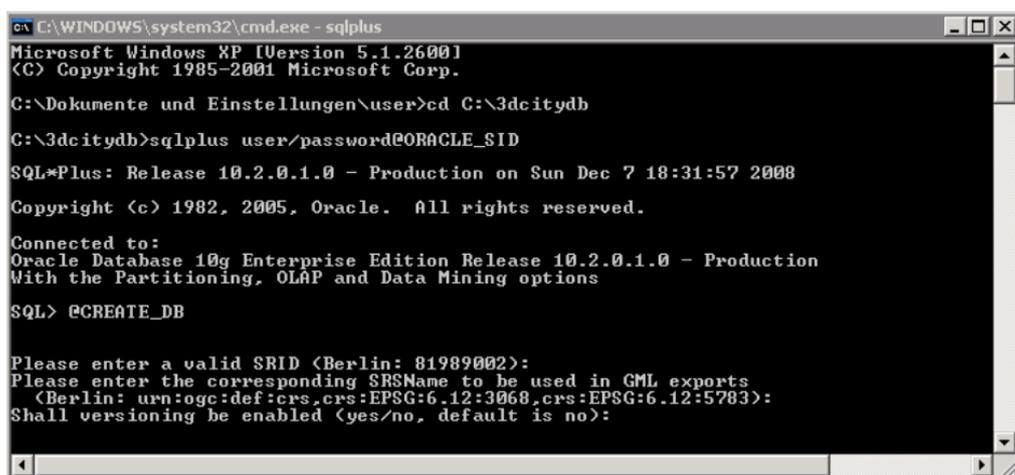
SGBD Critères de choix	PostgreSQL/Postgis	Oracle Spatial	MySQL
Standards	-Spécifications OGC SFS - ISO SQL/MM part3	- Spécifications OGC - ISO 19107	-Il s'écarte assez sensiblement de la norme SQL - Spécifications OGC
Modèles de données	Objet Relationnel	Objet Relationnel	Relationnel
Utilisation	-Support de PostgreSQL 8.3 par ArcGIS9.3 -Utilisé dans des projets SIG Open source tels que O3DG - Très utilisé par des utilisateurs indépendants	Partenariat avec FME Collaboration avec ARCGIS Sever Entreprise Leader des bases de données	-L'extension spatiale n'est pas assez utilisée -Le SGBD est très utilisé dans les applications web
Dimensions	- Coordonnées 3D - Géométries 2D	Coordonnées 3D Géométries 2D Solides simples tels que les cubes, pyramides	Coordonnées 3D Géométries 2D
Charges	-Taille maximum pour une base de données illimitée -Problème de rapidité pour les grands volumes de données	Plus performant Oracle Locator offre moins de fonctionnalités par rapport à Oracle Spatial car c'est gratuit	-Relativement rapides car il n'utilise pas les contraintes d'intégrité référentielle -Relativement rapide par rapport à PostgreSQL
Coût	Gratuit	- Oracle spatial Payant - Oracle Locator Gratuit	Gratuit

Tab5. 4. Comparaison entre les SGBD Oracle, MySQL et PostgreSQL (Koussa, 2011)

Si on considère la prise en charge de la 3D au niveau du SGBD, PostgreSQL permet le stockage des coordonnées 3D mais les géométries sont essentiellement 2D. Par contre, Oracle Spatial prend en charge certains objets volumiques simples à travers le type "SDO_Geometry". Au niveau interopérabilité avec CityGML, les premiers développements ont été orientés vers la prise en charge du standard CityGML dans Oracle, notamment, la base de données Open Source « 3DCityDatabase » dont le schéma est basé sur CityGML et qui permet le stockage, la représentation et la gestion des modèles 3D urbains ainsi que les modèles numériques de terrain et les photos aériennes géo référencées (<http://www.3dcitydb.net>). En plus, un outil open source a été développé pour l'intégration des fichiers CityGML dans la «3DCityDatabase». Une version de la «3DCityDatabase» ainsi qu'un outil d'import du CityGML pour le SGBD PostgreSQL sont maintenant disponibles (<http://www.3dcitydb.net>).

En résumé, le SGBD Oracle est très performant et dispose de fonctionnalités 3D plus avancées que les autres SGBD comme PostgreSQL. Il est reconnu comme le leader des bases de données spatiales de par sa performance dans le stockage et l'indexation des données 3D ainsi que ses fonctionnalités avancées dans leur gestion. Son schéma spatial est supporté par un bon nombre d'outils commerciaux comme Esri/ArcGIS/ARCSDE, FME et Bentley Microstation qui peuvent assurer la connexion avec la base de données Oracle. Nous l'avons adopté pour l'implémentation physique du modèle 3D collaboratif. Le niveau de prise en charge de la 3D et la compatibilité avec le standard CityGML sont pour nous les critères les plus pondérés.

Nous avons créé une instance Oracle sous la version 11gR2 qui intègre le module Oracle Spatial. Nous y avons installé la «3DCity Database» via le script «Create_DB.sql» (Fig5.5). Des droits d'accès sont définis pour chaque type d'utilisateur. La connexion à l'instance de base de données Oracle est assurée via l'interface de "sqlplus", en spécifiant le nom d'utilisateur et le nom de la base de données (Oracle_SID). Des modifications sont ensuite appliquées au schéma source de la base pour le rendre conforme aux spécifications du modèle 3D collaboratif et ce, via l'interface de « Oracle SQL Developer ».



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - sqlplus
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Dokumente und Einstellungen\user>cd C:\3dcitydb
C:\3dcitydb>sqlplus user/password@ORACLE_SID
SQL*Plus: Release 10.2.0.1.0 - Production on Sun Dec 7 18:31:57 2008
Copyright (c) 1982, 2005, Oracle. All rights reserved.

Connected to:
Oracle Database 10g Enterprise Edition Release 10.2.0.1.0 - Production
With the Partitioning, OLAP and Data Mining options

SQL> @CREATE_DB

Please enter a valid SRID (Berlin: 81989002):
Please enter the corresponding SRSName to be used in GML exports
  (Berlin: urn:ogc:def:crs:crs:EPSG:6.12:3068,crs:EPSG:6.12:5783):
Shall versioning be enabled (yes/no, default is no):

```

Fig5. 5. Fenêtre d'installation du script « Create_DB.sql »

Il faut noter que le script est fourni avec les paramètres du système de référence pour la ville de Berlin. L'utilisateur doit ainsi spécifier les paramètres de référence propres à son application, notamment le SRID (*Spatial Reference Identifier*): une valeur unique codée en

entier pour identifier un système de référence géographique et qui fait l'objet d'une nomenclature adoptée par l'EPSG (*European Petroleum Survey Group*). La documentation d'un SRID est standardisée par l'OGC et décrite sous forme textuelle (en format WKT: *Well Known Text*), mais son implémentation peut varier selon les SGBD. Les paramètres décrivant le SRID portent sur le datum géodésique (paramètres de l'ellipsoïde de référence, le méridien central, etc.) et sur le quadrillage (pour les systèmes projetés) : nom de la projection, latitude origine, méridien central, translation en X et en Y de la fausse origine, etc. Notons que le système belge Lambert 1972, qui est officiellement le système de référence en Belgique, a une valeur de "31370" pour le SRID (<http://spatialreference.org/>)

5.5 Les modèles existants

Nous avons proposé un modèle 3D collaboratif que nous avons implémenté selon le SGBD Oracle. La deuxième étape consiste à intégrer les bases de données existantes dans la base de données collaborative. La conception et la mise en œuvre du processus d'intégration nécessite une étude analytique préalable sur les types de représentations existantes pour le bâtiment dans les référentiels géographiques des trois organismes (IGN, SPW, AGDP), que nous présentons et analysons dans cette partie.

- Les données de l'IGN sont représentées par l'Inventaire Topo-Géographique (ITGI). La version ITGI-Vref représente le référentiel topographique à l'échelle (1/10000) pour les données de référence. Les bâtiments font partie du thème construction. Dans le catalogue d'objets ITGI, un bâtiment est défini comme une «*Construction pourvue de parois (toit, murs, fenêtres, sols etc.), qui enferment complètement un espace utilisable et accessible par l'homme via des portes ou des portails. La construction a un caractère permanent et elle est ancrée dans le sol, généralement à l'aide de fondations*». La géométrie de base d'un bâtiment est un polygone dont le contour s'apparente à son emprise au niveau du sol. Les bâtiments sont restitués au niveau de la corniche. Les superstructures et les parties souterraines ne sont pas représentées (*Fig5.6*). En principe, uniquement les bâtiments dont la surface est de 12m² ou plus sont sélectionnés avec quelques exceptions (les petites chapelles, les tours isolées, etc.). Des bâtiments contigus ayant les mêmes valeurs de l'attribut «BuildUse» (qui désigne l'usage du bâtiment) sont sélectionnés et représentés par un seul bâtiment (cas d'un groupe de bâtiments scolaires). Au niveau attributaire, les bâtiments sont décrits avec les attributs: «BuildForm», «BuildUse», «Date de modification», «Origine de la géométrie XY», et «Origine de la géométrie Z».

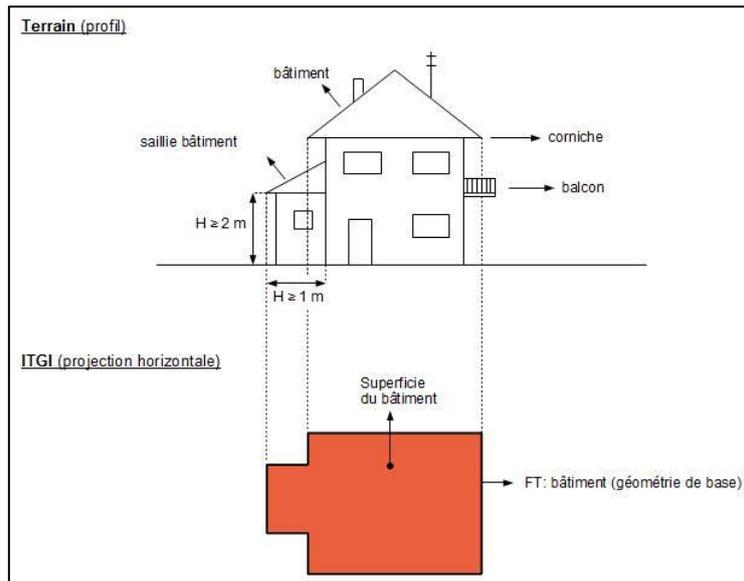


Fig5. 6. Représentation géométrique du bâtiment dans le modèle ITGI de l'IGN (www.ngi.be)

- Les bâtiments gérés par le Service public de la Wallonie font partie du référentiel PICC (Projet Informatique de Cartographie Continue) qui représente une cartographie numérique de l'ensemble du territoire Wallon à l'échelle de référence de 1/1000. Les données proviennent d'une restitution photogrammétrique à l'échelle 1/6000. Les éléments possèdent une précision planimétrique et altimétrique moyenne de 25 cm. Les données du PICC sont regroupées en diverses thématiques dont le thème «Construit» où sont classés les bâtiments. Actuellement, il n'existe pas de catalogue de données décrivant formellement l'ensemble des éléments repris dans ces thématiques. Cependant, un certain nombre de documents existent pour décrire les données. Le modèle de données du PICC est basé sur la norme suisse Interlis. La figure 5.7 représente le schéma UML du topic "Construit".

Le bâtiment est défini comme: «une structure fermée; construction avec fondation, à laquelle on peut affecter une ou plusieurs identifications univoques (adresse) = habitation, église, immeuble, usine, etc.». L'entité Bâtiment est représentée par la classe «EIBatiment»: une super classe abstraite dont dérivent les deux classes-filles: «BatimentS» et «BatimentL». La classe «BatimentS» représente une géométrie surfacique du bâtiment générée à partir des murs levés. La classe «BatimentL» a une géométrie Polyligne et conçue pour récupérer les levés au sol qui ne permettent pas d'avoir une mesure exacte de l'ensemble du périmètre d'un bâtiment. Les classes «FonctionBatiment» et «Adresse» sont des classes attributaires qui permettent de stocker respectivement la fonction et l'adresse (Rue, Numéro, Localité, Code Postal) pour les instances de la classe «EIBatiment».

- Les données attributaires sur le bâtiment ne sont pas suffisamment riches pour chaque base de données, prise à part. En effet, les données cadastrales adoptent une taxonomie plus riche décrivant la nature du bâtiment. Alors que les informations attributaires dans la BD de l'IGN sont insuffisantes et incomplètes. Du côté PICC, la fonction du bâtiment est bien renseignée, mais avec une résolution sémantique moins bonne que celle des données cadastrales. Il en résulte que les données attributaires relatives au bâtiment constituent des connaissances dispersées qu'il faut pouvoir intégrer dans le modèle collaboratif.

5.6 L'intégration des bases de données

L'intégration des bases de données géographiques a pour objectif d'unifier leur sémantique, d'éliminer les objets redondants et de regrouper les objets similaires (Devoegele et al. 1998). Elle peut porter sur plusieurs niveaux: l'intégration de leurs métadonnées (les catalogues), l'intégration de leur sémantique ou leur intégration complète (Devoegele, 1997).

Parmi les objectifs assignés au SIG 3D collaboratif, celui de réutiliser les données et les informations réparties entre plusieurs sources pour produire une base de données collaborative qui soit accessible à toutes les parties. Le processus d'intégration complète est ainsi recommandé. Il consiste à produire une base de données centralisée issue d'une intégration complète (schémas et populations) (Fig5.8), qui a pour schéma le schéma intégré et pour données, les données initiales transformées selon le format du schéma unifié, grâce à la définition des règles de traduction (Devoegele, 1997). La base de données centralisée assure ainsi une égalité d'accès et une facilité de gestion.

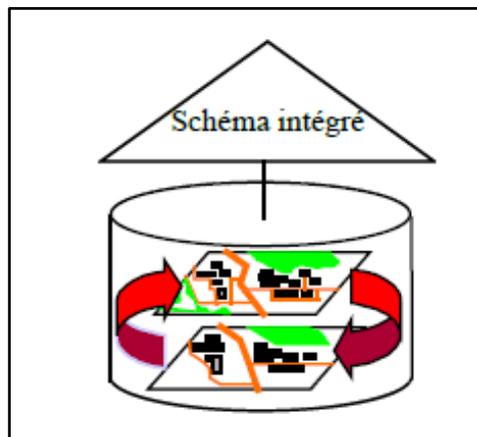


Fig5. 8. Base de données centralisée

L'intégration des bases de données doit reposer sur une stratégie d'intégration, définie selon le contexte, selon les types de bases de données à intégrer ainsi que selon l'objectif de l'intégration. Dans le cadre de la stratégie multi-représentations, les différentes représentations sont préservées et les éléments homologues (schémas et données) sont reliés entre eux. Cette stratégie a l'avantage de permettre des analyses multi-représentations, la réutilisation des représentations existantes et la possibilité d'intégration automatique des mises à jour (Olteanu, 2008). La stratégie mono-représentation, connue également sous le nom de «conflation» (Yuan et Tao, 1999; Blasby et al. 2003), consiste à fusionner les informations les plus riches et à éliminer les redondances. C'est cette dernière stratégie que nous avons adoptée pour l'intégration des bases de données.

L'intégration est réalisée à travers deux étapes, que nous exposons dans la suite :

- Une intégration des bases de données vers un schéma intermédiaire (schéma intégré) (*Partie 5.7*)
- Une traduction du schéma intégré vers le schéma du CityGML (*Partie 5.8*)

5.7 Intégration des BD vers un schéma intégré

5.7.1 Introduction

Il existe plusieurs critères pour définir l'objectif de l'intégration en fonction du type de schéma intégré souhaité. Parmi les critères identifiés par (Dupont, 1995), nous citons: la conservation (qui indique si toutes les informations initiales doivent être conservées), la précision (signale si l'opération conserve ou dégrade la précision initiale), la complétude (qui indique si toutes les redondances sont à éliminer par l'opération), l'unification (qui indique si la technique crée des éléments qui regroupent toutes les occurrences). Aussi, les critères d'optimisation et de simplicité du résultat sont souvent recherchés (Devogele, 1997). L'ensemble de ces critères est à pondérer en fonction de l'objectif de l'intégration.

Dans notre cas, le modèle 3D collaboratif doit servir comme référence pour un grand éventail d'applications. La précision géométrique est ainsi un critère fondamental qui doit être considéré en priorité. La donnée la plus précise est retenue dans la base de données intégrée. A défaut, d'autres critères comme la complétude et l'actualité sont utilisés pour piloter le processus d'intégration. A noter aussi que les bâtiments ayant une faible résolution géométrique (bâtiments généralisés selon la valeur de l'attribut «fonction», comme les bâtiments scolaires) peuvent être maintenus dans le module thématique «City Object Group» du CityGML, en leur attribuant une hauteur moyenne. Ce module peut être exploité dans certaines applications qui ne requièrent pas une information détaillée sur les bâtiments (Hajji et Billen, 2012).

5.7.2 Le processus d'intégration

Nous optons pour un processus d'intégration complète dont l'objectif est de réutiliser et fédérer l'information géométrique et sémantique provenant des différentes sources. Le processus est à la fois géométrique et sémantique.

La base de données issue de l'intégration est une base de données centralisée qui a pour schéma, le schéma intégré et dont les instances représentent les données initiales qui sont conformes au schéma intégré et qui ont subi un processus d'appariement et de réconciliation par sélection. Nous avons accompli le processus d'intégration selon trois principales étapes qu'on retrouve dans (Sheeren et al, 2004; Devogele, 1997) (*Fig5.9*) : La pré-intégration, la déclaration des correspondances et l'intégration proprement dite.

La pré-intégration est une étape préliminaire qui a pour but de préparer les données sources et faire converger les descriptions initiales pour faciliter leur comparaison. Cette étape est réalisée à travers:

- la collecte des métadonnées pour interprétation facile des schémas ;
- la préparation des bases de données initiales par:
 - unification des systèmes de coordonnées (Belge Lambert 1972);

- minimisation des différences de modélisation à travers certaines opérations géométriques (comme la conversion de multi polygones en polygones); des corrections topologiques, etc ;
- l'analyse des conflits entre les données et les schémas ;
- le choix du schéma intégré et la détermination des mécanismes de traduction des données initiales vers ce schéma: le schéma intégré doit s'aligner sur le schéma de la base de données collaborative.

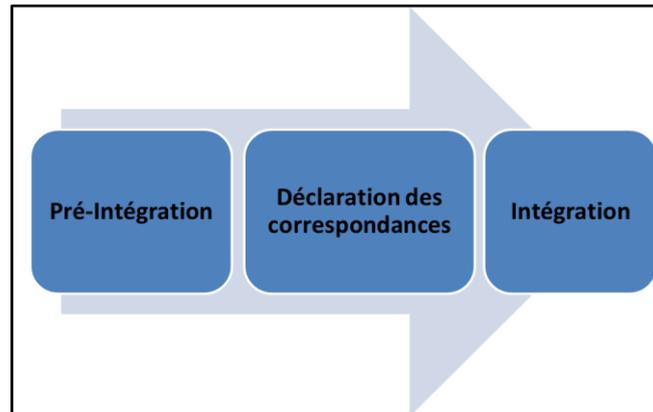


Fig5. 9. Etapes du processus d'intégration

La déclaration des correspondances est une étape d'exploration du contenu de chaque base de données pour la recherche des similarités et des connexions possibles en vue d'une déclaration des correspondances au niveau géométrique et sémantique entre les instances des bases de données. La déclaration des correspondances fait appel au processus d'appariement.

Dans l'étape d'intégration proprement dite, il faut résoudre les conflits identifiés dans les déclarations de correspondances et définir les règles de transformation des données et de traduction entre les schémas sources et le schéma intégré.

5.7.2.1 La pré-intégration: Analyse des conflits

Les bases de données à intégrer présentent des différences dans leur structure et dans leur population, désignées par conflits d'intégration. La taxonomie établie par (Devogele, 1997) (*Fig3.9*) regroupe les conflits les plus répandus entre les bases de données géographiques. Nous l'avons adoptée comme référence pour identifier et classer les conflits qui existent entre les bases de données sources.

- **Conflits liés aux sources de données**

Dans les différentes bases de données, les sources de données diffèrent entre levés photogrammétriques, levés terrains par station totale ou GPS, etc. Aussi, certaines données sont échangées entre les organismes, comme le cas des prises de vue aériennes entre le SPW et l'IGN. Il en résulte que la combinaison de plusieurs sources pour une même base de données engendre des difficultés de détermination de la précision.

- **Conflits d'hétérogénéité**

- **Dans le positionnement**

Ces conflits sont dus aux différences entre les systèmes de coordonnées adoptés. Les trois jeux de données utilisent deux systèmes différents: le système Lambert 1972 (pour l'AGDP et le PICC) et le système Lambert 2008 (pour l'IGN). Des transformations sont alors nécessaires pour unifier le système de coordonnées.

- **Dans la modélisation et l'abstraction de la 3D**

Les deux jeux de données provenant de l'IGN et du PICC adoptent une modélisation 2.5D où chaque position (x, y) est augmentée avec une valeur de Z. Les données cadastrales, par contre sont en 2D. Les spécifications de saisie définies pour le bâtiment sont différentes et doivent être prises en compte dans la confrontation des données. En effet, les bases de données de l'IGN et du PICC représentent la surface du bâtiment par l'emprise à la hauteur des corniches (restitution photogrammétrique). Par contre, le bâtiment du cadastre est représenté par son emprise au sol (les sources de saisie étant des relevés de terrain) (Fig5.10).

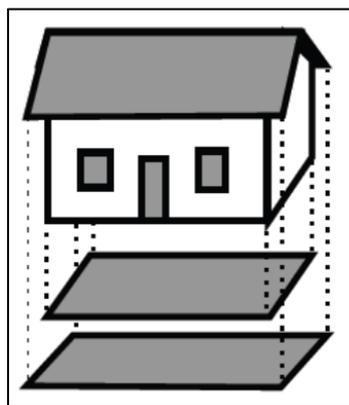


Fig5. 10. Les deux modes de représentation de la géométrie du bâtiment

- **Conflits de métadonnées géométriques**

Ces conflits sont dus aux différences de résolution, d'échelle et de précision entre les bases de données, qui résultent essentiellement des spécifications de saisie et de sélection. En effet, les données du PICC sont les plus précises géométriquement (précision moyenne de 25cm), mais leur actualité fait défaut vu que le référentiel du PICC n'est pas mis à jour de façon systématique. Par contre, le référentiel topographique de l'IGN a une bonne cohérence géométrique (topologique et proximale) et une bonne actualité grâce à un programme de mise à jour systématique. Cependant, la précision géométrique résultante d'une cartographie à l'échelle 1/10000 est moins bonne. Les données cadastrales ont une bonne précision pour certains attributs comme la nature du bâtiment (plusieurs modalités sont représentées). Aussi, le niveau de détail (ou la résolution géométrique) des bâtiments est grand et permet de discrétiser les unités du bâtiment.

- **Conflits de définition des classes**

- **Conflits de classification**

Il existe entre les bases de données des conflits de résolution de classification. A titre d'exemple, dans la base de données de l'IGN, une distinction est faite entre les bâtiments représentés par la classe (*Co_Building*) et les autres constructions, classées en constructions polygonales, linéaires ou ponctuelles. Au niveau du PICC, le découpage est cartographique et les constructions sont classées dans une seule couche géométrique de type polygone.

- **Conflits de critères de spécification**

Ils sont dus à des différences dans les spécifications de contenu et de saisie entre les bases de données. Par exemple, les bâtiments de l'IGN sont représentés selon un critère de sélection géométrique (la surface doit être $>12m^2$ pour que le bâtiment soit représenté).

- **Conflits de fragmentation**

Le découpage en objets n'est pas identique d'une base à l'autre. Il existe un conflit de fragmentation quand un objet (ou un ensemble d'objets) dans une base correspond à un objet (ou un ensemble d'objets) dans l'autre base, sans qu'il soit possible d'établir une relation bijective entre les objets. Par exemple, à cause des différences de résolution géométrique, un bâtiment de l'IGN peut correspondre à plusieurs bâtiments du PICC ou du cadastre. Il s'agit ici d'un conflit de décomposition.

- **Conflits de description sémantique**

Ils concernent les conflits de description des classes (classes avec des noms différents) et des conflits de description simples entre les attributs (noms, domaines différents, etc.). Par exemple : la classe «*Co_Building*» de la base de données de l'IGN correspond à la classe «*Elbatiment*» de la base de données du PICC. L'attribut «*Nature*» de la base de données cadastrale est équivalent à l'attribut «*Fonction*» de la base de données du PICC.

- **Conflits de données**

Ce dernier type de conflit survient lorsque les objets homologues n'ont pas les mêmes valeurs pour les attributs en correspondance. Dans les bases de données géographiques, les conflits de données trouvent leur source dans les autres conflits précités (conflits de précision, de résolution, d'exactitude et de spécification). Pour les objets géographiques, la valeur de l'attribut géométrique est plus difficile à évaluer avec précision. Deux saisies manuelles de la géométrie (*Fig5.11*) produiront deux restitutions différentes.

Des opérations de généralisation peuvent entraîner des conflits de données plus complexes. Par exemple, certaines spécifications de saisie imposent la diminution du nombre d'instances d'une même classe, ayant une même valeur d'attribut (comme la fonction). Cette opération de simplification spatiale consiste à conserver l'expressivité globale au dépend de la cardinalité (le nombre de bâtiments) (*Fig5.12*).

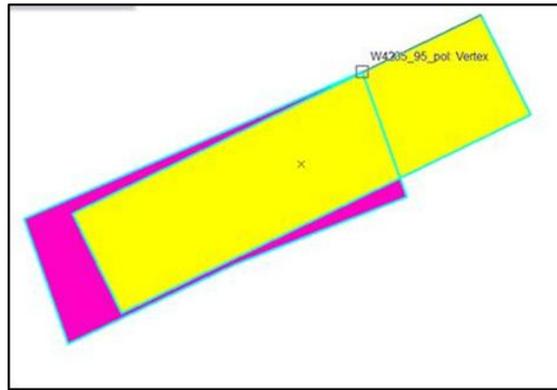


Fig5. 11. Conflit de données dû à deux saisies différentes du même bâtiment

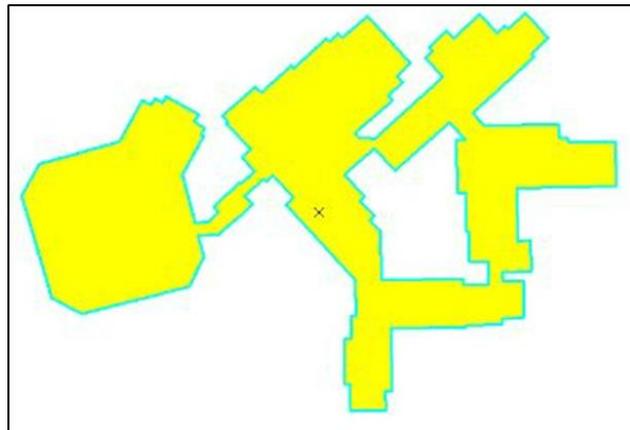


Fig5. 12. Représentation par généralisation d'un ensemble de bâtiments par une seule entité géométrique

5.7.2.2 L'appariement: choix de l'approche

Dans le cas de connaissances réparties entre plusieurs bases de données, les approches d'appariement multi critères sont recommandées. Elles considèrent les informations sur les géométries, la topologie, et l'information attributaire pour choisir les meilleurs candidats (Mustière et Devogele, 2008). Ainsi, dans les bases de données géographiques sensiblement différentes en contenu et en niveau de détail, où la géométrie et la topologie peuvent ne pas être suffisantes, l'information attributaire et la sémantique peuvent être exploitables pour guider le processus d'appariement (Olteanu, 2008). L'appariement dit sémantique utilise les ontologies pour évaluer la similarité entre les objets en considérant les relations sémantiques existantes (Duckham et al, 2006; Ressler et al, 2009). Les ontologies sont aussi utiles pour la formalisation des connaissances issues des spécifications de bases de données géographiques et peuvent être utilisées pour guider le processus d'appariement (Abadie, 2012).

Parmi les approches d'appariement de surfaces, nous citons celle de Belhadj (2001). Cette approche est composée de quatre étapes (Fig5.13) :

- Détection des liens d'appariement probables sur base de l'intersection entre instances géométriques:
Il existe un lien d'association entre les deux instances A_i et B_j si et seulement si la Surface $(A_i \cap B_j) \neq 0$.

- Filtrage: Suppression des liens parasites et des intersections insuffisantes en ne conservant que les liens qui respectent la mesure d'association :

$$\text{Association } (A, B) = \begin{cases} \text{Vrai si} \\ \text{Surface } (A \cap B) > \min (R1, R2) ; \text{ avec } R1 \text{ et } R2 \text{ les résolutions des} \\ \text{BD contenant } A \text{ et } B \\ \text{et Surface } (A \cap B) > \text{Surface}(A) \times 0,2 \\ \text{et Surface } (A \cap B) > \text{Surface}(B) \times 0,2 \\ \text{Faux sinon} \end{cases}$$

- Etablissement des liens multiples en calculant une matrice d'association.
- Filtrage des liens [n-m] :
 - Utilisation de la notion de "Détermination" Pour valider un lien de type n-à-m ou à défaut le remplacer par un lien plus satisfaisant n'-à-m' (avec n' ≤ n et m' ≤ m).
 - Parcours des liens [n-m], pour recherche de la configuration qui maximise à la fois l'exactitude et la complétude. En retirant certains liens, la somme exactitude complétude se trouve maximisée. Ces liens sont alors supprimés et la cardinalité du lien est ainsi réduite.

Pour une présentation détaillée de l'approche, nous renvoyons le lecteur vers la référence (Belhadj, 2001).

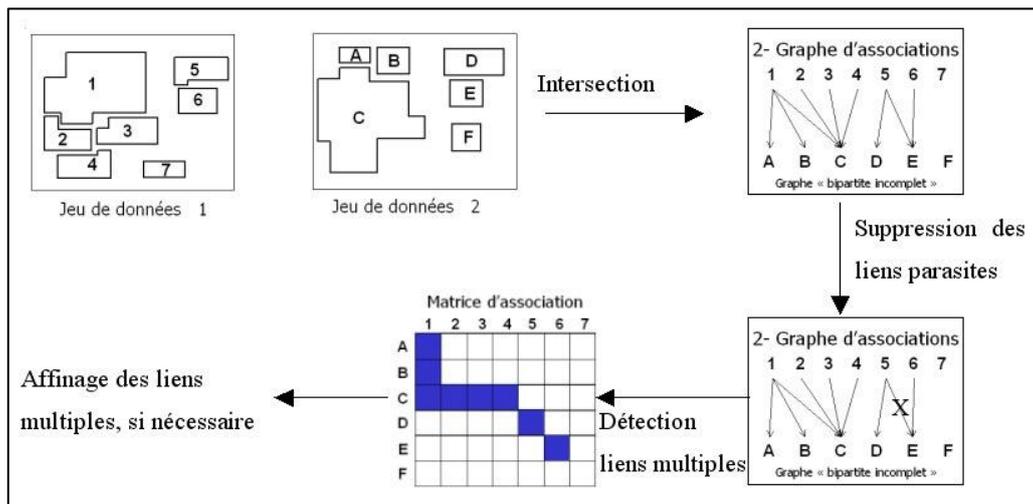


Fig5. 13. Les étapes du processus d'appariement proposé par Belhadj (2001)

La méthode de Belhadj (2001) utilise uniquement l'information géométrique. Cette méthode requiert, de la part de l'utilisateur, un seul paramètre qui est un seuil de coupure sur une fonction mesurant l'inclusion relative entre les candidats à l'appariement, dite fonction d'inclusion (Belhadj, 2001). Cette fonction peut servir comme une mesure de ressemblance entre les entités surfaciques; si deux entités sont très ressemblantes, leur fonction d'inclusion tend vers l'unité. Elle est définie par :

$$Fi(A, B) = \frac{S(A \cap B)}{\text{Min}[S(A), S(B)]}$$

Pour les bases de données qui n'ont pas les mêmes spécifications de saisie, de précision géométrique, sémantique, etc. Belhadj (2001) recommande l'utilisation de deux paramètres liés à la distance surfacique, qui sont désignés par l'exactitude et la complétude (voir Belhadj, 2001).

Olteanu (2008) propose une approche d'appariement multicritères basée sur la formalisation des connaissances hétérogènes par l'utilisation de la théorie des fonctions de croyance. Le processus représenté par la figure 5.14 est réalisé en cinq étapes. La première étape est une étape de sélection des candidats à l'appariement selon un critère de distance géométrique. La deuxième étape est une étape d'initialisation des masses de croyance qui consiste pour chaque critère d'appariement à se prononcer sur chaque candidat en lui attribuant une croyance dans les hypothèses définies à l'égard de chaque candidat. Cette étape est suivie d'une fusion des critères d'appariement pour chaque candidat (troisième étape), puis d'une fusion des candidats afin d'avoir une vue d'ensemble sur les croyances attribuées à tous les candidats (quatrième étape). La dernière étape du processus est une étape de décision où le meilleur candidat est choisi.

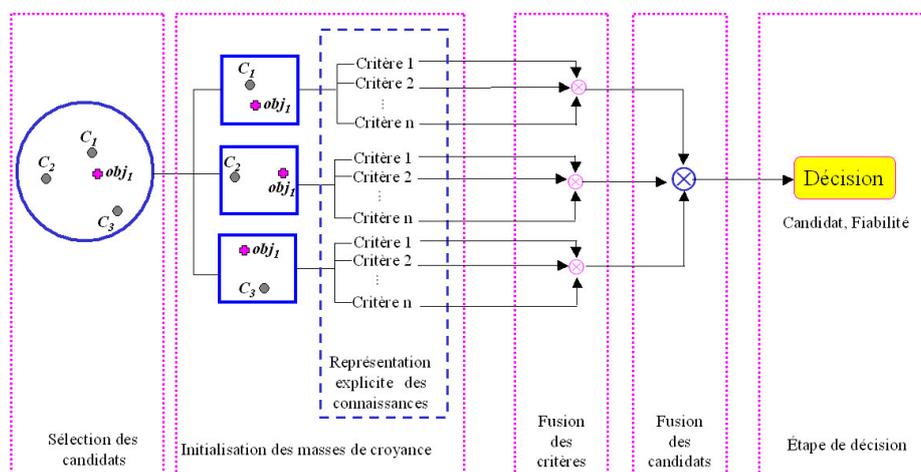


Fig5. 14. Etapes de l'appariement multi critères proposé par (Olteanu, 2008)

L'appartenance à une même catégorie d'entités géographiques fournie par l'appariement des schémas peut être un critère préjudiciable pour les autres types d'appariement (Abadie, 2012). L'auteur propose une méthode d'appariement de schémas qui s'articule autour de deux étapes : une première étape d'ancrage qui consiste à aligner les éléments de schémas avec les éléments d'une taxonomie de référence, dite taxonomie de support. Elle est suivie d'un calcul de similarité sémantique entre les concepts de la taxonomie auxquels les éléments de schémas ont été ancrés, en utilisant la méthode de Wu-Palmer (Fig5. 15)

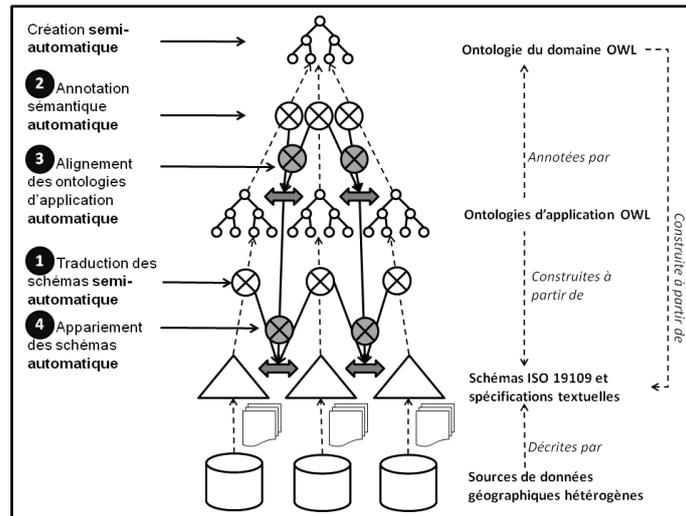


Fig5. 15. Processus global d'appariement de schémas de BD géographiques fondé sur des valeurs d'attributs et une ontologie de support (Abadie, 2012)

- **Notre choix**

Les conflits d'intégration que nous avons identifiés dans la partie précédente nous permettent, d'une part de définir l'approche d'appariement à adopter et d'autre part, ils serviront pour guider l'analyse des résultats du processus. L'objectif de l'appariement consiste à rechercher les correspondances en vue de sélectionner l'information la plus fiable pour le modèle 3D. Aussi, il convient de sauvegarder l'information sur la source ainsi qu'un indice de qualité pour exprimer une éventuelle incertitude du résultat de la fusion d'information.

Le laboratoire COGIT (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) à l'IGN France détient une grande expérience dans les techniques d'appariement des données. Nous citons, sans exhaustivité, certaines publications dans ce sens: (Lemarié, 1996); (Lemarié et Raynal, 1996); (Devoegele, 1997); (Badard, 2000); (Belhadj, 2001); (Sheeren, 2002); (Olteanu, 2008), (Abadie, 2012), etc. Nous avons eu l'occasion de faire des tests avec certains processus développés au sein de ce laboratoire et qui sont abrités sous la plateforme GeOxygene.

Notre objectif ne vise pas une étude exhaustive sur les méthodes d'appariement de surfaces. Raison pour laquelle, nous nous sommes limités à l'exploration des méthodes développées dans le laboratoire COGIT pour choisir une version adaptée à notre contexte. Les approches précitées proposent chacune des critères qui ont été testés dans des contextes spécifiques. Dans notre cas, les bases de données sources comportent des entités surfaciques. Elles sont différentes en spécifications de saisie et en précisions géométrique et sémantique. L'approche de Belhadj (2001) paraît être la plus adaptée à notre contexte puisqu'elle est centrée sur les surfaces. En plus, sa robustesse a été démontrée dans le cas de l'appariement des données de type "Bâtiment". Nous l'adoptons ainsi comme approche de base pour l'appariement en testant la variation des seuils associés au paramètre géométrique représenté par la distance surfacique. D'une base de données à l'autre, les spécifications de saisie font que l'information attributaire soit hétérogène et que la connaissance complète sur la sémantique soit répartie entre les bases. Par exemple, la fonction d'un bâtiment représente un attribut important dans le modèle collaboratif que nous

avons proposé. Il faut pouvoir alors récupérer ses valeurs à partir des informations disponibles. Dans Le référentiel PICC, la fonction d'un bâtiment est désignée par un attribut explicite qui est nommé «Fonction». Dans les données cadastrales, les bâtiments sont classés en fonction de leur nature cadastrale selon un attribut nommé «Nature». Ce dernier a une bonne résolution sémantique qui peut être exploitée pour extraire une information sur la fonction du bâtiment. Les liens d'appariement établis entre concepts sémantiquement proches permettent ainsi une extraction d'information. Un autre avantage de l'inclusion du critère sémantique dans le processus d'appariement est la possibilité de l'exploiter comme source d'information supplémentaire aux critères géométriques pour minimiser la cardinalité des liens [n-m] dans l'algorithme proposé par Belhadj (2001). Nous optons ainsi pour une «intégration d'approches» où plusieurs critères sont combinés pour améliorer les résultats du processus d'appariement à travers un mariage entre l'approche de Belhadj (2001) et celle proposée par Abadie (2012).

Nous avons opté pour un alignement sémantique entre les schémas des bases de données à appairer en s'appuyant sur la mesure de distance sémantique de Wu-Palmer. Pour ce faire, nous avons créé, pour chaque base de données, une ontologie (ou une taxonomie) à partir de l'extraction des concepts figurant dans son schéma. Nous avons utilisé comme ontologie de support la taxonomie des concepts topographiques établie dans le cadre de la thèse de (Abadie, 2012). Les ontologies sont créées à l'aide du logiciel d'édition d'ontologies "Protégé". Les Figures (5.16), (5.17), (5.18), (5.19), représentent respectivement l'ontologie de support et les ontologies créées pour les bases de données du PICC, de l'AGDP et de l'IGN. Les résultats de l'alignement des schémas permettent d'affecter un indice de similarité sémantique qui est introduit comme paramètre supplémentaire au critère géométrique (distance surfacique) dans l'algorithme d'appariement. Des tests ont été effectués pour ressortir la meilleure combinaison de paramètres. Le processus d'appariement adopté est présenté dans la figure 5.20.

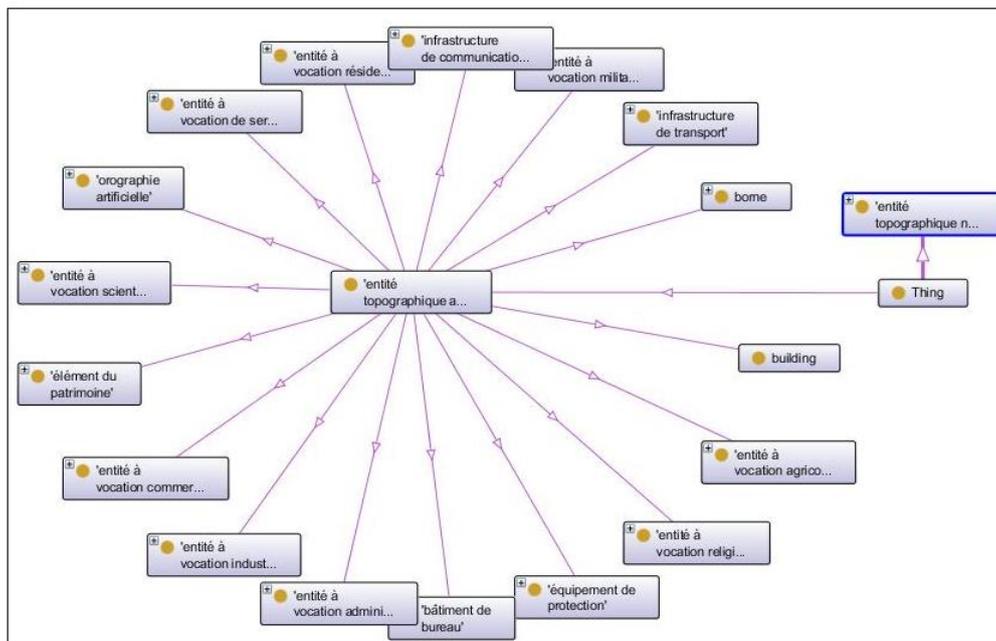


Fig5. 16. Ontologie de support (visualisée sous Protégé)

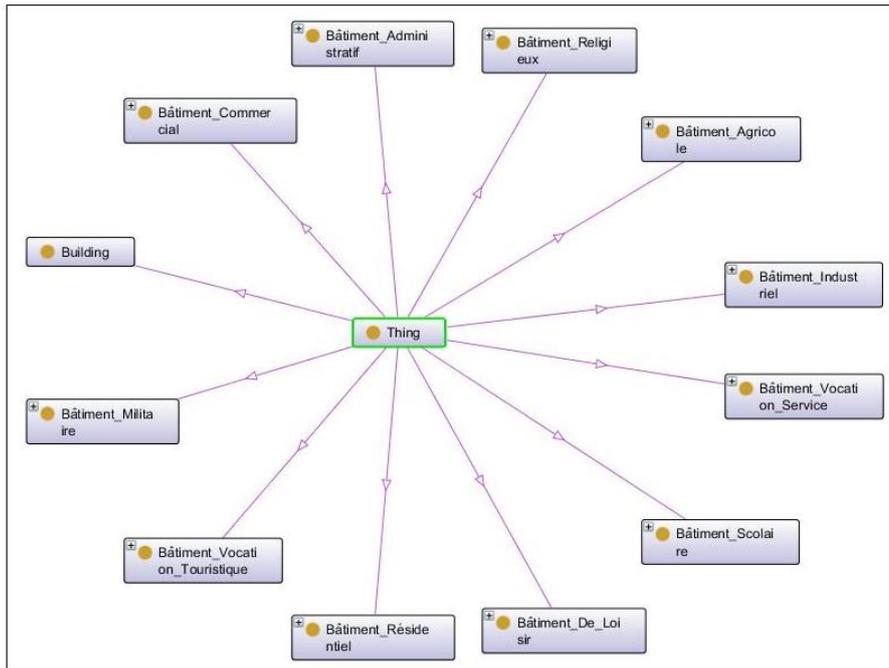


Fig5. 17. Ontologie établie pour la base de données du PICC (visualisée sous Protégé)

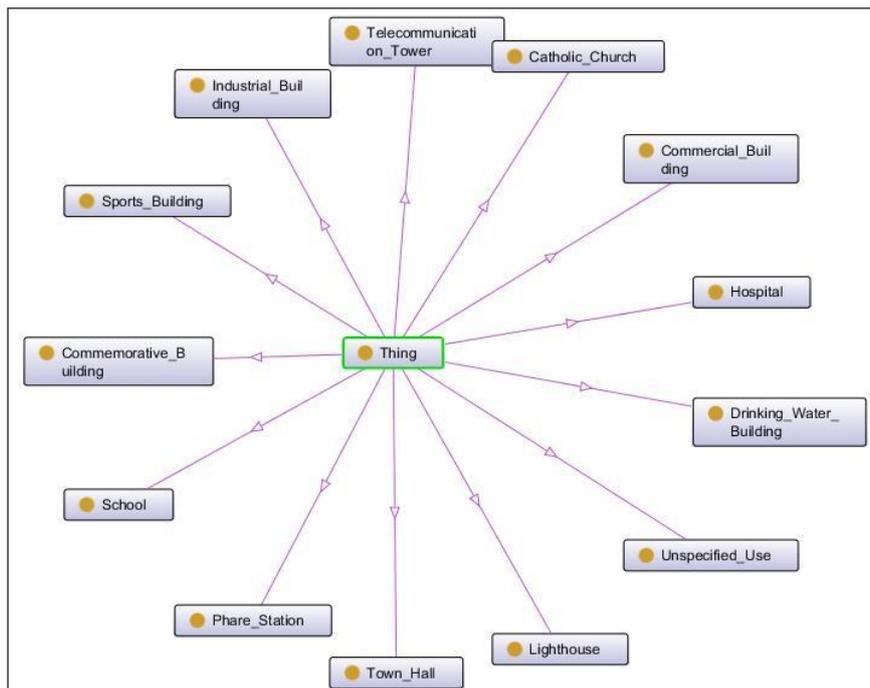


Fig5. 18. Ontologie établie pour la base de données de l'IGN (visualisée sous Protégé)

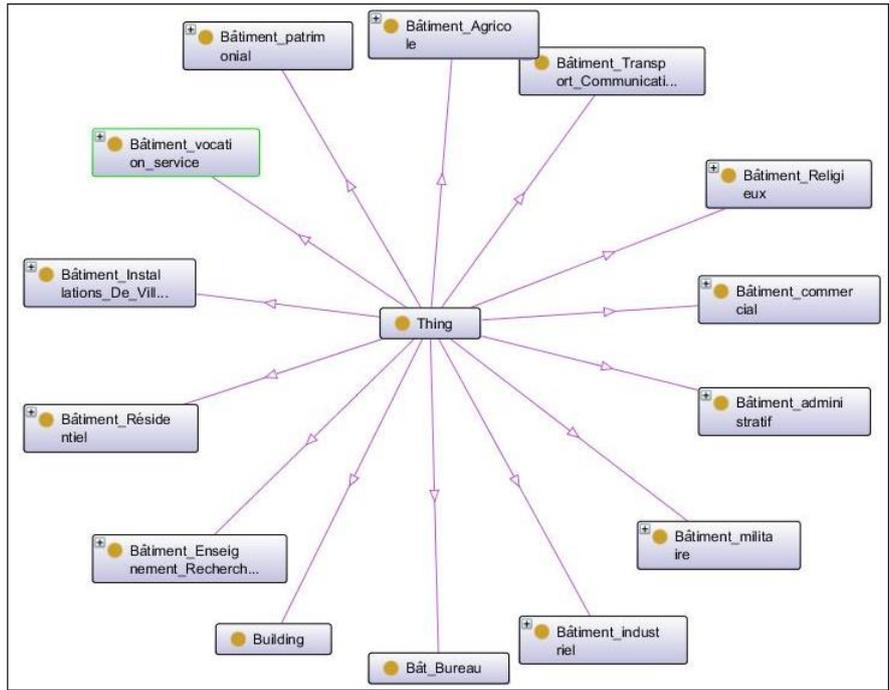


Fig5. 19. Ontologie établie pour la base de données de l'AGDP (visualisée sous Protégé)

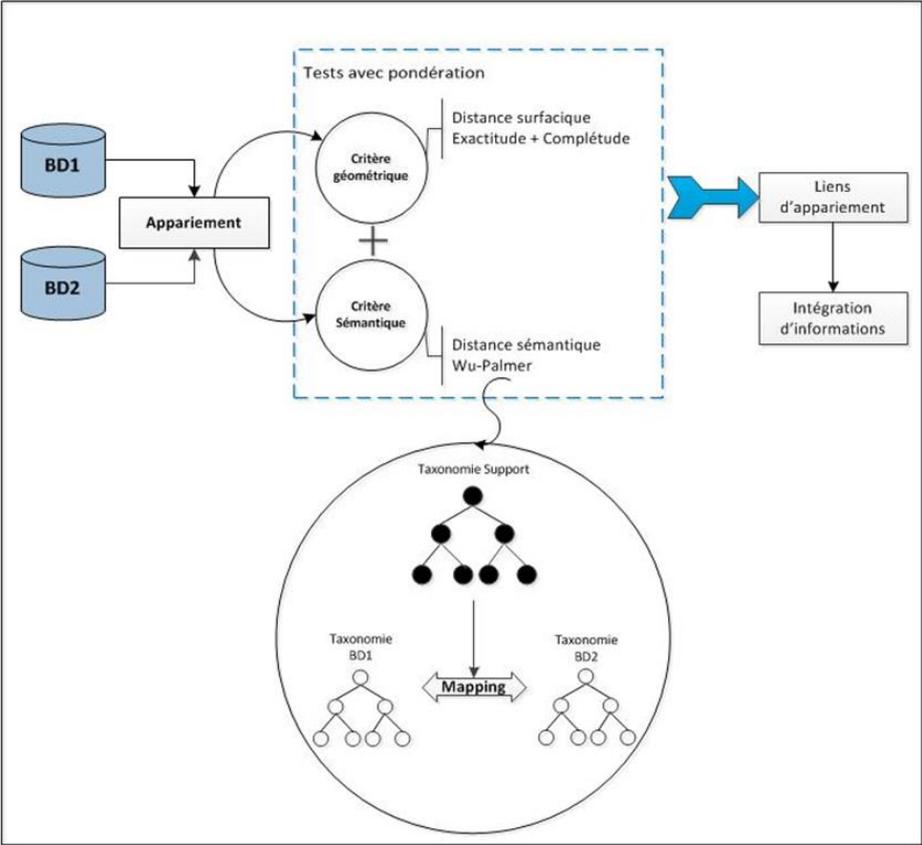


Fig5. 20. Le processus d'appariement adopté

5.7.2.3 L'appariement : Expérimentation et évaluation

Avant d'entreprendre les processus d'appariement, nous nous sommes fixés deux objectifs. Le premier objectif consiste en une intégration d'information à travers l'extraction de l'information sémantique représentée par l'attribut «Nature» de la base de données du cadastre en vue de la transférer sur la position géométrique des données du PICC. Tandis que le deuxième objectif vise une mise à jour la base de données du PICC à partir des données de l'IGN qui sont caractérisées par une bonne qualité temporelle. Le premier appariement combine le critère géométrique et sémantique dans la mise en correspondance entre les objets. Tandis que le deuxième appariement se contente de l'application du seul critère géométrique. L'exclusion du critère sémantique dans ce dernier cas est due à l'incomplétude de l'information sémantique dans la base de données de l'IGN.

Dans cette partie, nous présentons les tests d'appariement effectués. Nous faisons, ensuite une analyse et une discussion des résultats que nous avons obtenus, qui sera suivie d'une évaluation quantitative des tests d'appariement et une interprétation des résultats.

- **Présentation des tests**

Les tests ont été effectués sur des jeux de données issus de trois bases de données portant sur la même étendue géographique. Il s'agit de la base de données du PICC, de la base de données de l'AGDP et de la base de données de l'IGN. Les trois bases présentent des différences au niveau de la qualité géométrique, sémantique et temporelle et aussi au niveau des spécifications de saisie. L'objectif est de fusionner l'information provenant de ces trois sources en vue de produire une seule couche de données d'une meilleure qualité.

L'approche d'appariement adoptée utilise le critère géométrique et sémantique. Théoriquement, la combinaison de ces deux critères permettrait une amélioration du processus d'appariement vu que l'information sémantique peut s'avérer, dans certains cas, un paramètre de décision important dans le cas de la proximité géométrique entre l'objet de référence et les objets candidats à l'appariement. Le critère géométrique est représenté par la distance surfacique entre les entités à apparier. Alors que le critère sémantique est représenté par la distance sémantique (la similarité sémantique) entre les concepts liés à la fonction du bâtiment et qui sont représentés par des attributs différents dans les trois bases de données. La distance de Wu-Palmer est utilisée pour mesure de la similarité sémantique entre les concepts de l'objet de référence et des objets de comparaison, en se basant sur l'ontologie de support (*Fig5.16*). L'appariement consiste à rechercher les objets homologues et à établir des liens de cardinalités différentes: [1-1] ; [1-n] ; [n-1] et [n-m] entre les objets appariés. Les tests sont réalisés en spécifiant des seuils pour la recherche des candidats et en variant les paramètres associés au critère géométrique et au critère sémantique en vue d'étudier leur impact.

Pour l'établissement des liens d'association, nous avons adopté un seuil de 5m pour enlever les intersections parasites, qui est choisi en fonction de la surface de la plus petite entité dans les jeux de données à apparier. Les intersections sont ensuite filtrées pour éliminer les intersections insuffisantes en spécifiant un seuil de 10% pour la fonction d'inclusion. Un seuil de sélection élevé permet de prendre en compte l'imprécision dans les données et de sélectionner tous les homologues potentiels. Il en résulte qu'un lien d'association entre deux objets A et B est maintenu si :

Surface $(A \cap B) > \min(R1, R2) = 5m$; avec R1 et R2 les résolutions des bases de données contenant A et B

et Surface $(A \cap B) > \text{Surface}(A) \times 0,1$

et Surface $(A \cap B) > \text{Surface}(B) \times 0,1$

Dans la suite, nous notons BDDRef: la base de données de référence et BDDComp: la base de données de comparaison. C'est-à-dire que pour les objets de la BDDRef nous cherchons des objets homologues dans la BDDComp. Généralement, les termes de référence et de comparaison n'ont aucun lien avec la qualité des jeux de données. Les appariements sont effectués entre les trois bases de données en prenant la base de données du PICC comme BDDRef et les deux autres bases comme des bases de comparaison (BDDComp).

- **Analyse et discussion des résultats**

Une première évaluation des tests d'appariements est réalisée à travers une analyse préalable des résultats au regard de l'impact de la variation des paramètres associés au critère géométrique et au critère sémantique. Cette analyse est complétée par une évaluation quantitative des appariements par rapport à un appariement manuel adopté comme référence en vue de la qualification de la détection. L'analyse préalable des résultats est basée sur une inspection visuelle et sur la comparaison du taux des liens multiples et des liens simples obtenus en faisant varier les paramètres géométrique et sémantique.

- Le critère sémantique

Un avantage attendu du critère sémantique est de diminuer les risques d'erreurs d'appariement en éliminant d'emblée les liens générés entre objets n'ayant pas une bonne similarité sémantique, et qui pour des raisons de proximité spatiale auraient pu être considérés comme homologues (*Fig5.21*). Cependant, il arrive fréquemment que deux objets à appairer soient très proches d'un point de vue sémantique alors que leur distance surfacique est grande (*Fig5.22*). En outre, l'utilité du critère sémantique pourrait être perçue à travers son impact sur la cardinalité des liens multiples. Ainsi, grâce à la mesure de la similarité sémantique entre les entités appariées, la cardinalité d'un lien [n-m] pourrait être réduite en le remplaçant par un lien [n'-m'] de cardinalité inférieure et des liens de type [1-1], lorsque les entités participantes au lien multiple n'ont pas la même valeur pour le critère sémantique. D'autre part, le calcul de la similarité sémantique entre deux attributs associés au bâtiment permet de piloter la prise de décision en termes de fusion d'information sémantique entre la BDDRef et la BDDComp lors de l'étape post-appariement.

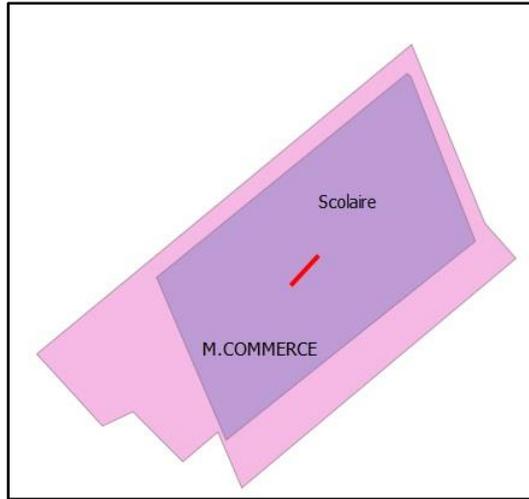


Fig5. 21. Cas de lien invalide (distance surfacique = 0.43 et similarité sémantique = 0.2)

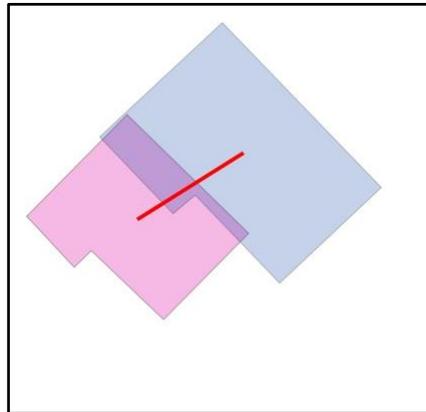


Fig5. 22. Cas de lien invalide (distance surfacique = 0.91 et similarité sémantique = 1)

Pour statuer sur l'apport du critère sémantique dans le processus d'appariement, nous avons effectué des tests en attribuant au poids sémantique les valeurs: 0; 0.5 ; 0.6; 0.7; 0.8. Pour chaque appariement, nous avons calculé le nombre de liens [1-1] et [n-m] pour visualiser l'impact du critère sémantique sur le nombre de liens générés et sur leur cardinalité. Les résultats sont représentés dans les figures (Fig5.23) et (Fig5.24).

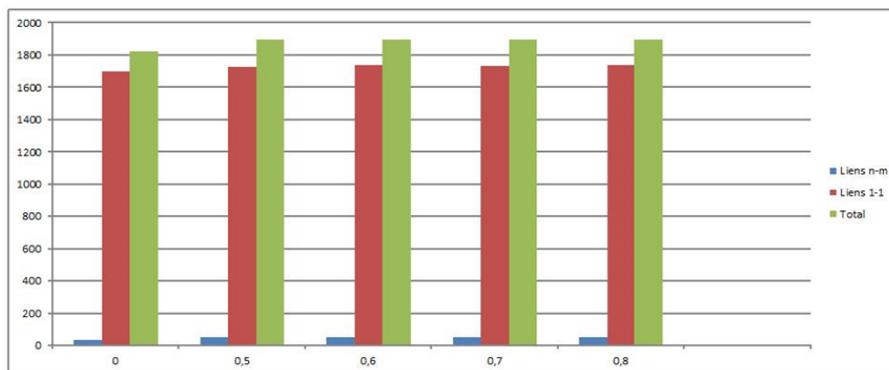


Fig5. 23. Nombre de liens simples et multiples par variation du poids sémantique

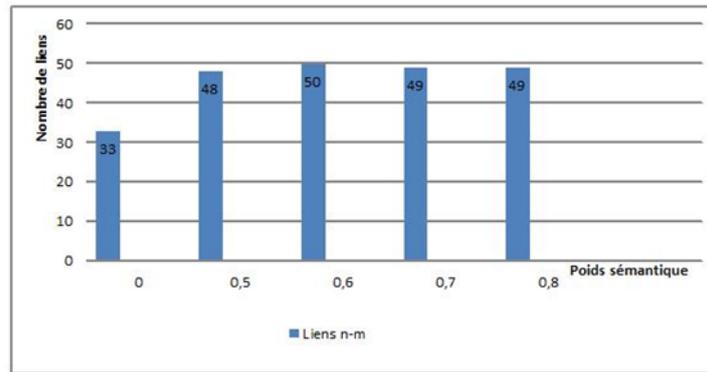


Fig5. 24. Nombre de liens multiples en fonction du poids accordé au critère sémantique

Abstraction faite de la qualité des liens générés, nous pouvons conclure que l'appariement donne de bons résultats vu que 90% des liens générés sont de cardinalité [1-1] et uniquement 2% des liens sont de type [n-m], ce qui facilite l'étape de post-appariement qui consiste à analyser les résultats en vue de la fusion des informations provenant des deux jeux de données appariés. A travers la lecture des résultats, nous pouvons ressortir les deux remarques suivantes :

- L'ajout du critère sémantique fait augmenter le nombre de liens [n-m] générés par le processus d'appariement au détriment du nombre des liens [1-1].
- La variation du poids accordé au critère sémantique n'introduit pas un impact significatif sur les résultats d'appariement en termes du nombre de liens et de leur cardinalité.

En faisant une inspection visuelle des liens [n-m] résultant du processus d'appariement, nous avons pu conclure que ces liens sont générés dans le cas de bâtiments contigus de type résidentiel. Les entités participantes à ces liens ont des valeurs identiques pour l'attribut «*Fonction*» de la BDRéf et aussi pour l'attribut «*Nature*» de la BDComp, ce qui donne un indice de similarité sémantique égal à 1. Le problème n'est pas algorithmique car ces liens sont difficiles à interpréter même par analyse visuelle. Ces types de liens doivent être isolés et transmis à un opérateur pour prise de décision par consultation d'une troisième source d'information. D'autre part, tous les liens [n-m] introduits par l'ajout du critère sémantique sont considérés comme invalides. Ils sont générés entre instances présentant une faible proximité géométrique mais qui sont très proches du point de vue sémantique (*Fig5.25*). Nous pouvons ainsi conclure que l'application stricte du critère sémantique pourrait établir des liens indésirables qui ne sont pas générés lorsque le seul critère géométrique est d'application. Nous pouvons cependant envisager son utilisation lorsque les liens sont établis entre instances présentant une bonne proximité géométrique. On pourrait appliquer un seuil de filtrage préalable aux liens en fonction des valeurs des distances surfaciques et faire une application restrictive du critère sémantique sur les liens résultants du filtrage. Son apport pourrait ainsi vu comme paramètre de décision plutôt que d'être imposé à priori dans tous le processus d'appariement.

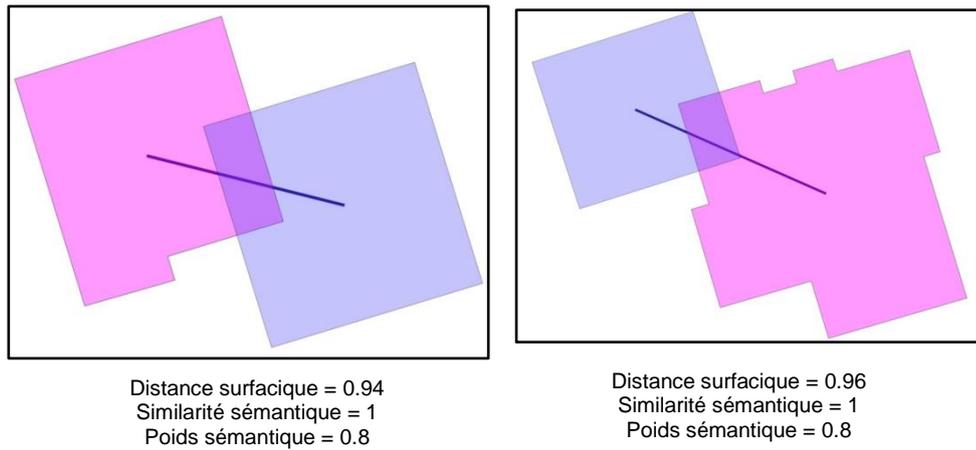


Fig5. 25. Cas de liens invalides générés dans le cas d'une grande similarité sémantique entre deux candidats à l'appariement

- Le critère géométrique

Les tests d'appariement sont effectués avec différentes valeurs associées au paramètre géométrique représenté par la fonction d'inclusion. L'appariement permet de conserver les liens optimaux ayant une valeur de la fonction d'inclusion supérieure à un certain seuil. Nous avons testé les valeurs des seuils dans le cadre des deux appariements PICC-AGDP et PICC-IGN. Les résultats sont reportés dans les figures 5.26 et 5.27.

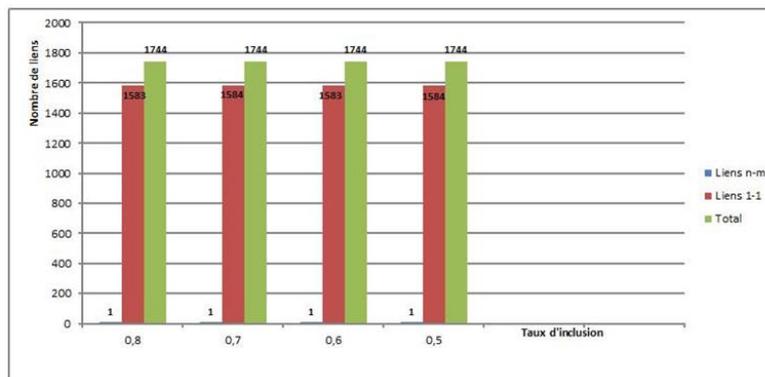


Fig5. 26. Répartition de la cardinalité des liens en fonction du taux d'inclusion (Cas PICC-IGN)

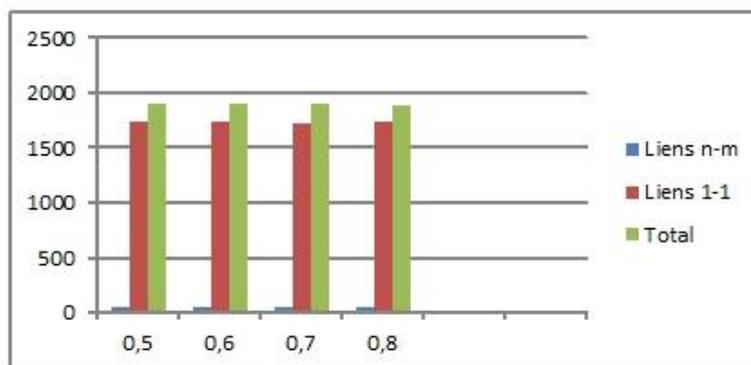


Fig5. 27. Répartition de la cardinalité des liens en fonction du taux d'inclusion (Cas PICC- AGDP)

Les résultats démontrent que le changement du seuil accordé à la fonction d'inclusion n'introduit pas un changement significatif sur les résultats. Les différences de résolution géométrique entre la BDRéf et les BDComp font que les géométries s'intersectent avec un taux d'inclusion important. En effet, la plupart des liens générés présentent une bonne proximité géométrique donnant des valeurs de la fonction d'inclusion supérieures ou égales à 80%. Cependant, la seule proximité géométrique n'est pas suffisante pour établir des liens sûrs entre les objets. Les différences de résolution géométrique pourraient générer des liens entre objets différents en termes de rapport de surfaces, qualifiés de liens invalides (Fig5.28). Ces liens concernent une configuration bien particulière. Les entités, faisant partie de ce type de lien, présentent une inclusion presque totale de l'une dans l'autre avec une différence significative au niveau de leurs surfaces respectives. Parmi ces liens, on peut distinguer deux catégories: l'inclusion des entités du premier jeu dans le deuxième ou bien l'inverse.

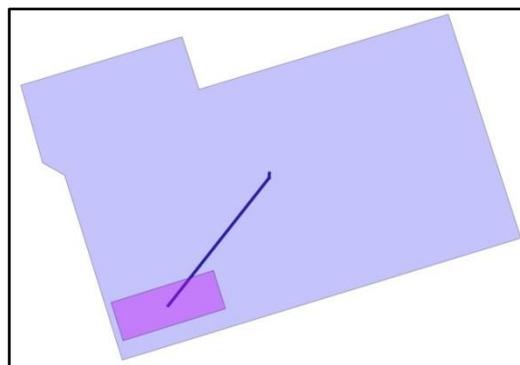


Fig5. 28. Lien invalide dû à une différence significative des surfaces des entités appariées

Aussi, l'inspection visuelle des résultats soulève un autre problème, celui de la ressemblance des formes et d'orientation entre les objets appariés. En effet, deux entités peuvent être appariées selon leur écart de position sans que leurs formes et leurs orientations soient identiques ou proches. Ce cas est illustré par la figure 5.29, ce qui démontre que dans certains cas, le critère de position est insuffisant et que la comparaison des formes et des orientations est requise pour améliorer l'exactitude des résultats. Les différences de forme peuvent être détectées par l'utilisation de la distance entre les fonctions angulaires, la distance entre les signatures polygonales et la distance entre les moments géométriques invariants (Belhadj, 2001).

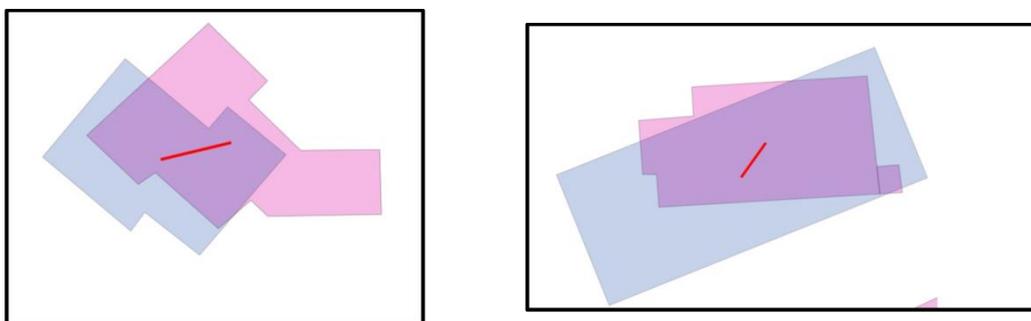


Fig5. 29. Cas d'appariement avec conflit d'orientation et de forme géométrique

Dans certains cas, il est même difficile d'identifier les objets homologues visuellement. En raison de cette complexité, il résulte toujours un certain nombre d'erreurs d'appariement.

Ces erreurs doivent être identifiées pour différencier les couples certains des couples incertains. Les erreurs peuvent avoir une influence sur les résultats de l'évaluation. Le recours à une autre source d'information peut s'avérer nécessaire pour statuer sur la validité d'un lien d'appariement incertain.

- **Evaluation quantitative**

L'évaluation des résultats est une étape importante dans le processus d'appariement des données géographiques. Cependant, cette étape est une étape interactive dans la plupart des approches (Olteanu, 2008). Une façon de présenter les résultats de l'évaluation du processus d'appariement est de s'appuyer sur des termes de confiance comme par exemple "incertain" et "sûr" pour qualifier les liens d'appariement (Mustière et Devogele, 2008). Les liens incertains doivent être validés éventuellement par un opérateur. (Beerli et al. 2004) et (Safra et al. 2006) présentent la qualité de l'appariement en termes de précision et de rappel. C'est cette dernière méthode que nous adoptons pour évaluer les résultats des appariements obtenus. Pour ce faire, nous avons réalisé une référence, en faisant un appariement manuel sur un échantillon de données. Dans l'appariement manuel, tous les objets sont appariés. En cas d'indécision due à un conflit géométrique et/ou sémantique, l'objet homologue est attribué un identifiant <Null>.

La précision représente le nombre de liens justes par rapport au nombre de liens trouvés. Tandis que le rappel représente le nombre de liens justes trouvés par rapport au nombre de liens définis dans la référence (Olteanu, 2008). L'évaluation est faite à travers une matrice de confusion (Fig5.30) qui permet de qualifier les liens établis, à travers le calcul des paramètres suivants: les vrais positifs (VP), les faux positifs (FP) et les faux négatifs (FN).

Matrice de confusion		Données de référence	
		Lien présent	Lien absent
Données reconstruites	Lien présent	Vrai positif	Faux positif
	Lien absent	Faux négatif	-

Fig5. 30. Matrice de confusion

La précision est définie par: **Précision = VP / (VP + FP)**

Le rappel est défini par: **Rappel = VP / (VP + FN)**

La mesure appelée F-score est une autre mesure qui combine équitablement la précision et le rappel, elle est définie comme suit :

$$\mathbf{F\text{-score} = 2 * (\text{précision} * \text{rappel}) / (\text{précision} + \text{rappel})}$$

Notons la signification des éléments de la matrice de confusion :

- **Les vrais Positifs (VP):** représentent les objets correctement appariés, ce qui donne l'exactitude de l'appariement par rapport à la référence.
- **Les Faux Positifs (FP):** représentent les objets appariés à tort. Ce sont les objets présents dans l'appariement mais n'ayant pas d'homologues dans la référence ou ayant un résultat qui n'est pas identique à l'appariement manuel. La quantification des faux positifs doit faire abstraction des cas de conflits identifiés lors de l'appariement manuel et pour lesquels aucune décision n'est prise. Dans ce cas,

l'erreur n'est pas algorithmique, elle est imputée aux données sources et demande l'intervention d'un opérateur pour prise de décision.

- **Les Faux Négatifs (FN)** : ce sont les objets qui ont été omis dans l'appariement.

D'autres critères d'évaluation de la qualité d'appariement sont présentés dans (Boudet, 2007). Leurs équations sont reportées dans le tableau 5.5.

- Le **taux de détection** estime l'exhaustivité de la reconstruction, c'est à dire la proportion d'objets de la référence correctement reconstruits.
- Le **taux d'omission** estime son opposé, c'est à dire la proportion d'objets de la référence qui ne sont pas reconstruits.
- Le **taux de sur-détection** estime la proportion d'objets reconstruits à tort parmi ceux reconstruits.
- Le **branch factor** permet d'estimer la tendance du système à reconstruire des objets n'existant pas dans la référence, c'est à dire à créer de nouvelles hypothèses.
- Le **miss factor** permet d'estimer la tendance d'échec du système à reconstruire les objets de la référence.
- Le **taux de qualité** est un indicateur de la qualité globale de la reconstruction, donnant la proportion des objets correctement reconstruits parmi tous les objets présents.

Mesure de qualité	Equation
Taux de détection	100. (VP/VP+FN)
Taux d'omission	100. (FN/VP+FN)
Taux de sur-détection	100. (FP/VP+FP)
Branch factor	FP/VP
Miss factor	FN/VP
Taux de qualité	100. (VP/VP+FP+FN)

Tab5. 5. Critères de qualité pour l'appariement avec leurs équations (Boudet, 2007)

Les résultats de l'évaluation quantitative des appariements PICC-AGDP et PICC-IGN sont présentés dans les tableaux suivants: *Tab5.6; Tab5.7; Tab5.8 ; Tab5.9*

Test	Seuil d'inclusion	Poids sémantique	VP	FP	FN	Précision	Rappel
Test #0	0.8	0	273	25	17	92%	94%
Test #1	0.8	0.5	274	23	17	92%	94%
Test #2	0.8	0.6	274	23	17	92%	94%
Test #3	0.8	0.7	274	23	17	92%	94%
Test #4	0.8	0.8	274	23	17	92%	94%
Test #5	0.5	0.5	274	23	16	92%	94%
Test #6	0.5	0.6	274	23	16	92%	94%
Test #7	0.5	0.7	274	23	16	92%	94%
Test #8	0.5	0.8	274	23	16	92%	94%
Test #9	0.6	0.8	273	24	16	92%	94%
Test #10	0.7	0.8	273	24	17	92%	94%

Tab5. 6. Evaluation des résultats d'appariement en termes de précision et de rappel-Cas PICC-AGDP

Critère de qualité	Valeur
Taux de détection	94%
Taux d'omission	5%
Taux de sur-détection	7%
Branch factor	0.08
Miss factor	0.06
Taux de qualité	87%

Tab5. 7. Evaluation des résultats d'appariement en utilisant les critères de qualité définis dans la table 5.5 (Cas PICC-AGDP)

Test	Seuil d'inclusion	Poids sémantique	VP	FP	FN	Précision	Rappel
Test #0	0.8	0	282	4	10	97%	96%
Test #1	0.7	0	282	4	10	97%	96%
Test #2	0.6	0	282	4	10	97%	96%
Test #3	0.5	0	282	4	10	97%	96%

Tab5. 8. Evaluation des résultats d'appariement en termes de précision et de rappel-Cas PICC-IGN

Mesure de qualité	Equation
Taux de détection	96%
Taux d'omission	3%
Taux de sur-détection	1%
Branch factor	0.01
Miss factor	0.03
Taux de qualité	95%

Tab5. 9. Evaluation des résultats d'appariement en utilisant les critères de qualité définis dans la table 5.5 (Cas PICC-IGN)

Une première lecture des tableaux ci-dessous permet de ressortir la remarque soulevée précédemment concernant l'invariabilité des résultats face au changement des seuils associés aux paramètres géométrique et sémantique et dont les explications ont été avancées dans l'analyse préalable.

Dans le cas de l'appariement PICC-AGDP, une précision de 92% pour les objets appariés signifie que parmi les liens d'appariement trouvés, 8% sont faux (des faux positifs). L'inspection des résultats a montré que ces liens sont de type [1-n], générés dans le cas où plusieurs candidats présentent les mêmes valeurs ou des valeurs proches pour la distance surfacique et la distance sémantique (Fig5.31). Ces liens confirment l'insuffisance de la fonction d'inclusion comme le seul paramètre géométrique de sélection des candidats. Ainsi, le rapport de surfaces entre l'objet de référence et plusieurs candidats à l'appariement peut être déterminant pour pallier à une génération éventuelle de faux liens de type [1-n] dus à une segmentation des objets dans la BDCComp. Ce cas se présente en général dans le cas d'appariement entre deux bases n'ayant pas la même résolution géométrique. Un traitement préalable des jeux de données pour fusion des objets connexes pourrait réduire le nombre des liens d'appariement invalides et améliorer ainsi le taux de qualité de la détection.

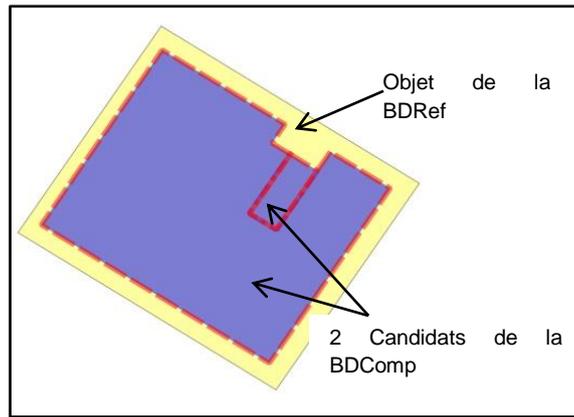


Fig5. 31. Cas d'un lien invalide dû à une segmentation de la BDComp

Dans le cas de l'appariement PICC-IGN, la précision de la détection est de l'ordre de 97%. La BDBRef a une résolution géométrique plus grande que celle de la BDComp, ce qui donne un nombre important de liens de type [n-1] et réduit significativement le nombre des liens [n-m]. L'exclusion du paramètre sémantique dans le processus d'appariement a été justifiée par l'incomplétude sémantique de la BDComp. Cependant, la considération du seul critère géométrique a donné des résultats satisfaisants dus à la différence du niveau de détail entre les deux bases.

La validité d'une approche d'appariement des données géographiques est fortement liée à la nature des données source et à l'objectif défini pour l'appariement. L'automatisation de tout le processus d'appariement est loin d'être triviale. L'opérateur doit toujours intervenir pour inspecter les résultats et vérifier la validité des liens établis à travers une étape d'évaluation et de prise de décision finale sur l'appariement. Le processus d'appariement doit être suivi par une étape de filtrage et de suppression des liens invalides en fixant un seuil d'acceptation. En effet, si la distance surfacique entre deux objets est de 0,4, cela signifie qu'il existe 60% de la surface des deux objets réunis qui est commune entre eux. On peut ainsi fixer un seuil sur les valeurs de cette distance, on n'admettant, par exemple que les couples d'objets qui ont une valeur de distance surfacique inférieure ou égale à 0,4 (60% d'inclusion). Pour une meilleure estimation de la qualité interne des liens d'appariement, il serait plus approprié d'adopter un facteur permettant de pondérer la similarité sémantique et la proximité géométrique entre les objets appariés. Dans le cas d'entités très proches en position géométrique et présentant une grande similarité sémantique entre les concepts alignés, ce facteur tend vers zéro. Un filtrage des liens pourrait être fait en choisissant un certain seuil d'acceptation. Nous avons défini une valeur de 0.5 pour ce seuil en se limitant à une inspection visuelle des résultats. Le filtrage a permis d'éliminer les liens où les objets n'ayant pas une bonne similarité sémantique, et qui pour des raisons de proximité spatiale ont été alignés (*Fig5.21*), ou les objets qui présentent une bonne similarité sémantique sans que leur positions géométriques soient proches (*Fig5.22*).

5.7.2.4 La fusion d'information

Une problématique qui rend l'interprétation des résultats d'appariement de données géographiques plus complexe est liée à la cardinalité des liens d'appariement, c'est-à-dire le nombre d'objets en correspondance. Dans le processus d'appariement, les liens générés ont des cardinalités différentes, d'une part en raison des niveaux de détail différents des bases de données appariées, et d'autre part en raison de la différence des règles de spécifications

de saisie associées à chaque base. L'appariement [1-1] apparaît lorsque les objets à apparier présentent une bonne proximité géométrique et/ou sémantique. Tandis que l'appariement [1-n] peut se produire à cause d'une différence de segmentation entre les deux bases. Les différences de segmentation ainsi que l'écart géométrique et/ou sémantique sont derrière la génération des liens [n-m].

Si des objets sont mis en correspondance, cela indique qu'ils représentent le même phénomène dans la réalité. Cela indique aussi que les différences, si elles existent, répondent au seuil d'acceptation (Sheeren, 2002). Dans les tests d'appariement effectués, nous avons maintenu les liens "certains" résultants du filtrage pour analyser leur cardinalité en vue d'une fusion d'information. Notons que les liens invalides ou non sûrs n'ont subi aucun traitement particulier, vu l'indisponibilité d'une source d'information supplémentaire. Nous considérons deux types d'analyses conformément aux objectifs prédéfinis pour l'appariement qui consistent en une fusion d'information sémantique et une mise à jour géométrique.

- **Fusion de l'information sémantique**

La décision sur la fusion d'information est réalisée sur base d'une analyse des cardinalités des liens obtenus dans le cas d'appariement entre la base de données du PICC (BDRef) et la base de données de l'AGDP (BDComp). Notons l'objet de référence par «*ObjetRef*» et l'objet homologue dans la base de comparaison par «*ObjetComp*». La base de données résultant de la fusion est notée «*BDFusion*». Vu que nous voulons maintenir la précision géométrique de la BDRef, seule l'information sémantique sera fusionnée à travers un transfert de la valeur sémantique de l'attribut «*Nature*» de la BDComp sur les données géométriques de la BDRef. L'information extraite sera stockée dans la BDFusion en tant qu'attribut représentant la fonction du bâtiment.

Dans les résultats d'appariement, 90% des liens trouvés sont de type [1-1]. Ces liens sont établis entre des objets quand la similarité géométrique et/ou sémantique respecte les seuils de sélection et d'acceptation définis dans le processus d'appariement. Les liens résultant du filtrage sont considérés comme des liens sûrs. Pour chacun de ces liens, on conserve la géométrie de l'ObjetRef et on récupère le concept de l'ontologie de support correspondant au concept stocké dans l'attribut «*Nature*» dans la BDComp. Dans le cas d'un lien de type [1-n], lorsque les n objets de la BDComp contiennent la même information sémantique, celle-ci est transférée sur la géométrie de l'ObjetRef. Dans le cas contraire, l'information sémantique de l'ObjetRef sera maintenue dans la BDFusion. Les autres liens présentant des cardinalités multiples, doivent être validés par un autre processus. A défaut, nous maintenons l'information sémantique contenue dans la BDRef pour les entités participantes à ces liens.

- **Mise à jour de la donnée géométrique**

L'analyse de l'appariement entre la base de données du PICC (BDRef) et la base de données de l'IGN (BDComp) présente un intérêt particulier dans la détection des évolutions géométriques intervenues dans la base de référence. Nous avons appliqué un filtrage des liens en ne maintenant que les liens présentant une distance surfacique supérieure à un seuil que nous avons choisi par analyse visuelle des résultats. Ce seuil a été fixé à la valeur de 0.6. Les liens résultants du filtrage sont considérés comme des liens certains. La détection des mises à jour est basée sur l'analyse des cardinalités obtenues :

- Les liens [1-1] mettent en correspondance deux objets présentant une proximité satisfaisante qui correspond aux seuils prédéfinis dans le processus d'appariement et dans l'étape de filtrage des liens sûrs. On distingue le cas où les géométries de l'ObjetRef et de l'ObjetComp sont très semblables et le cas où ces géométries présentent des différences signalant un cas de modification de l'ObjetRef. Des contrôles d'égalité géométrique (position, forme, rapport de surface) doivent être réalisés. Dans le cas d'absence de conflit géométrique, la géométrie de l'ObjetRef est conservée dans la BDFusion. Tandis que les liens simples présentant des différences de forme géométrique doivent être traités par contrôle externe pour sélection de la géométrie valide qui sera stockée dans BDFusion. Ces liens peuvent être imputés à une erreur de saisie ou à une modification de la géométrie de l'ObjetRef. Dans le cas d'une indécision, on conserve la géométrie de l'ObjetRef en lui associant une alerte de contrôle qualité.
- Les objets de la BDBRef qui n'ont pas été appariés (liens [1-0]) sont de l'ordre de 3%. Ils peuvent donner lieu à plusieurs interprétations. En effet, ce type de liens peut signifier que l'ObjetRef n'a plus une existence physique, ce qui justifie son absence dans la BDBComp. Il peut également s'agir d'une omission de saisie dans la BDBComp, c'est-à-dire à un cas d'erreur. Autrement, l'absence de l'objet peut être justifiée par les spécifications de saisie lorsque celui-ci ne répond pas au critère de sélection défini pour la BDBComp. Pour validation des hypothèses d'interprétation précitées, le recours à une autre source d'information est primordial. L'utilisation d'une ortho photo récente est recommandée.

Il s'avère à travers ce cas que la notification du statut du bâtiment (en démolition, en ruines, etc.), défini en tant qu'attribut dans la base de données collaborative pourrait apporter une information supplémentaire dans l'interprétation des liens d'appariement de type [1-0].

- Un lien de type [0-1] signale un cas de création d'objet qui doit être ajouté dans la BDFusion. 544 détections de mise à jour ont été trouvées. Les géométries associées à ces objets sont transférées dans la BDFusion. Il faut cependant noter que les objets résultant de la mise à jour ont une résolution géométrique moins bonne que celle de la BDBRef. Cette information sur la précision doit être conservée dans les métadonnées pour qualifier la position géométrique des objets ajoutés. Un complètement sur le terrain doit être programmé pour améliorer leur représentation et assurer une homogénéité de la résolution de la BDFusion.
- Les liens [1-n] ne sont pas très fréquents dans le cas où la BDBRef représente la meilleure résolution géométrique. Ce type de liens est établi si l'objet de la base BDBComp a éventuellement subi une scission. La comparaison des données attributaires associées aux objets pourrait confirmer cette hypothèse. Dans le cas de validation, les instances géométriques représentées par les n objets de la BDBComp seront maintenues dans la BDFusion. Parmi les trois liens [1-n] trouvés dans les tests, nous avons repéré un cas de scission tandis que les deux autres cas présentent une anomalie de saisie dans la BDBRef.
- Les liens [n-1] présentent un cas naturel dû aux différences de résolutions. La BDBRef étant d'une bonne résolution géométrique par rapport à BDBComp. Dans ce cas, les géométries associées à ces objets dans la BDBRef sont conservées dans la BDFusion.

- Les liens [n-m] présentent le cas des liens d'appariement les plus difficiles à gérer. Ils sont créés lorsque plusieurs objets de la BDRef sont appariés avec plusieurs objets de la BDComp. En raison de leur complexité, ces liens demandent l'intervention d'un opérateur pour validation avant qu'une fusion d'information géométrique soit réalisée.

5.7.3 Synthèse

La première étape d'intégration des bases de données a consisté en une fusion d'informations géométriques et sémantiques réparties entre les trois sources de données en vue de produire une couche de données ayant une bonne qualité géométrique, sémantique et temporelle. La fusion d'information a été réalisée en privilégiant la précision géométrique et en récupérant l'information sémantique la plus riche et la donnée la plus à jour.

Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé un processus d'appariement en vue de rechercher les correspondances entre les différentes bases en utilisant une approche combinant le critère géométrique et sémantique. Des tests ont été réalisés pour étudier l'impact de la variation des paramètres géométrique et sémantique sur les résultats de l'appariement et pour chercher la meilleure configuration de paramètres. Nous avons pu conclure, à travers l'analyse et l'évaluation des résultats, que le paramètre sémantique doit être utilisé à bon escient en tant que paramètre de décision supplémentaire lorsque la proximité géométrique entre les candidats à l'appariement est assurée. Nous avons également soulevé l'insuffisance du facteur de position comme le seul paramètre géométrique de décision. Des critères sur la forme et l'orientation pourraient améliorer les résultats. En outre, l'analyse des appariements nous a permis de ressortir plusieurs cas d'indécision qui nécessitent l'intervention d'un opérateur et la recherche d'une source d'information externe pour valider les résultats obtenus. Nous avons maintenu ceux qui répondent à un seuil d'acceptation que nous avons défini par inspection visuelle des résultats. La mise en correspondance entre les données du PICC et de l'AGDP a permis de représenter la fonction du bâtiment avec une meilleure résolution sémantique que celle des données de référence. L'appariement avec les données de l'IGN a été exploité pour la détection des mises à jour intervenues dans la base de référence. Cependant, la base de données résultat de la fusion (BDFusion) doit être complétée par des sources externes pour complètement et validation de certaines hypothèses d'interprétation.

La deuxième étape d'intégration consiste à traduire le schéma géométrique de la BDFusion selon les spécifications du standard CityGML. Elle fait l'objet de la partie suivante.

5.8 Traduction du schéma intégré vers le schéma Cible

La base de données résultant de la première étape du processus d'intégration a un schéma équivalent au niveau sémantique au modèle 3D collaboratif. Cependant, son schéma géométrique est de type 2.5D. Un processus de traduction entre les deux schémas est ainsi requis. Il est réalisé via deux étapes principales qui vont être présentées dans la suite :

- Une interpolation des hauteurs des bâtiments et une reconstruction de la géométrie 3D
- Un processus de mapping entre le schéma intégré et le schéma géométrique du CityGML.

5.8.1 Interpolation des hauteurs et reconstruction de la 3D

- **Interpolation des hauteurs**

Dans la base de données résultante de la première étape d'intégration, la géométrie est de type 2.5D. Chaque bâtiment est restitué au niveau de la corniche par la saisie d'un ensemble de points dont chacun est représenté avec ses coordonnées tridimensionnelles x, y, z. La hauteur des bâtiments n'existe pas en tant qu'attribut explicite. Il faut alors l'interpoler à partir des données altimétriques disponibles pour pouvoir reconstruire une géométrie 3D pour chaque bâtiment. Pour ce faire, nous avons conçu un processus d'interpolation pour attribuer une altitude moyenne (approximative) à chaque bâtiment. Le processus est illustré par la figure 5.32. Il a été exécuté dans l'environnement ArcMap du programme ArcGIS.

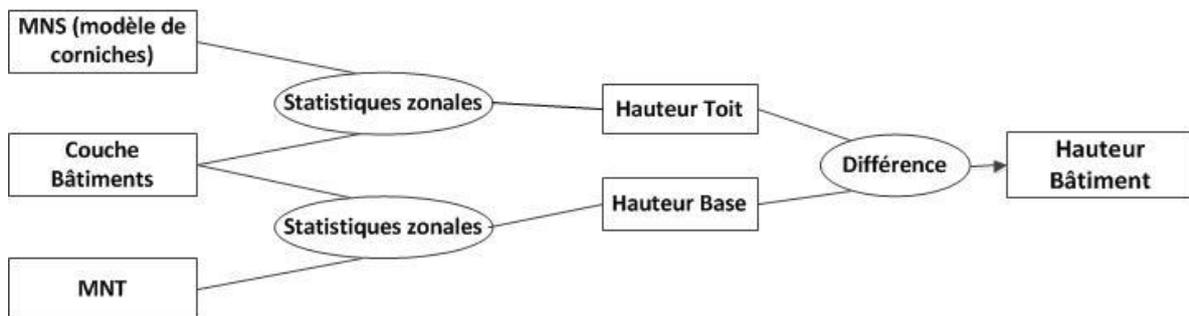


Fig5. 32. Processus d'interpolation des hauteurs des bâtiments

Les informations altimétriques comme les points du terrain naturel, les couches d'axes restitués au sol ainsi que les lignes caractéristiques du terrain ont été utilisées pour la création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), en spécifiant comment chaque source doit participer au processus de triangulation (hard lines ou mass points). Un Modèle Numérique de Surface (MNS) ou plus exactement un Modèle Numérique de Corniche (MNC) a été construit à partir de la couche des bâtiments représentant les contours au niveau de la corniche. Les trois surfaces MNT, MNC et la couche des bâtiments sont ensuite rastérisées avec une résolution de 2m, choisie en fonction de la plus petite résolution géométrique. Des calculs statistiques sont utilisés pour extraire la hauteur minimale et la hauteur maximale et en déduire l'altitude de chaque bâtiment qui est ajoutée comme attribut dans le schéma de la base de données.

- **Reconstruction de la 3D**

Pour la reconstruction de la géométrie 3D, deux outils sont utilisés :

1) FME (*Feature Manipulation Engine*): une boîte à outils pour le traitement et la conversion de données géographiques qui prend en charge, en lecture et en écriture, plus d'une centaine de formats de données et des dizaines d'opérateurs géométriques, topologiques et attributaires. Il permet de restructurer les données via la combinaison de transformateurs et les convertir en différents formats. FME est fourni avec plusieurs composants qui permettent la gestion des données spatiales, à savoir: *FME Workbench* (l'interface graphique de conception des traitements); *Universal Viewer et Data Inspector* (pour la consultation et la validation des données graphiques et attributaires) et *FME Quick Translator* (pour appliquer un traitement par défaut sans aucune personnalisation). Les transformateurs de Workbench sont des opérateurs géométriques, topologiques ou attributaires qui permettent de définir un

traitement dans Workbench. Chacun des transformateurs dispose d'une ou plusieurs interfaces en entrée et en sortie, avec des paramètres associés (Fig5.33).

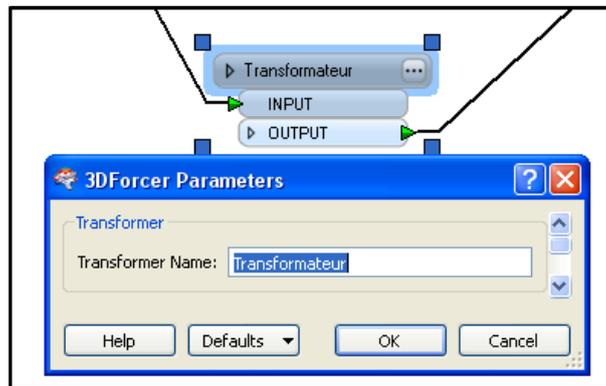


Fig5. 33. Exemple d'un transformateur FME

2) 3dsMax: un logiciel de modélisation 3D développé par la société Autodesk dont la première version date de 1990. Il offre plusieurs techniques de modélisation. Nous trouvons la modélisation à l'aide de primitives géométriques (standards, supplémentaires), la modélisation booléenne (union, soustraction, intersection), la modélisation à partir de formes 2D (extrusion, révolution, élévation), la modélisation par grilles surfaciques (carreaux de Bézier), la modélisation de surfaces NURBS, etc. Les primitives géométriques sont des formes de base (boîte, sphère, tore, etc.) que 3dsMax fournit en tant qu'objets paramétriques et dont les paramètres et caractéristiques peuvent être modifiés. Le programme offre une grande variété d'objets et de modificateurs standards.

Les bâtiments sont extrudés dans FME sur base de l'attribut "Hauteur" (Fig5.34), puis exportés sous format "3ds" compatible avec le logiciel 3dsMax, pour la modélisation 3D. A l'instar des autres logiciels de la famille Autodesk comme Autocad, 3dsMax permet de modéliser les données et structurer l'information selon différentes couches. Nous avons exploité cette fonction pour éditer les formes 3D des bâtiments et créer les couches «WallSurface», «GroundSurface» et «RoofSurface» pour chaque bâtiment. Les solides qui représentent les bâtiments extrudés sont convertis en patch éditable, puis structurés selon les couches thématiques du bâtiment selon le standard CityGML (Fig5.35). Le résultat est exporté en format .dwg qui est le format natif des outils Autodesk. L'opération est faite manuellement, mais avec l'augmentation de la taille des données, il convient de programmer des scripts pour automatiser cette tâche.

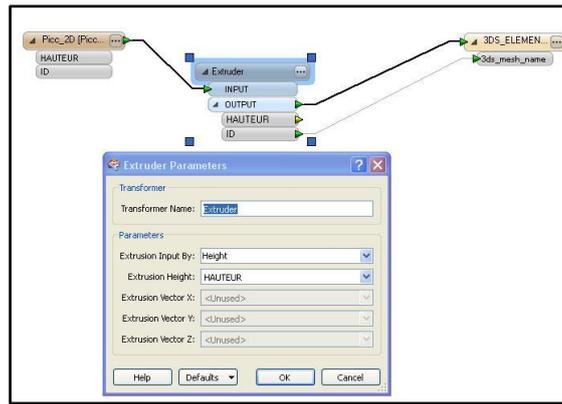


Fig5. 34. Extrusion des bâtiments dans FME

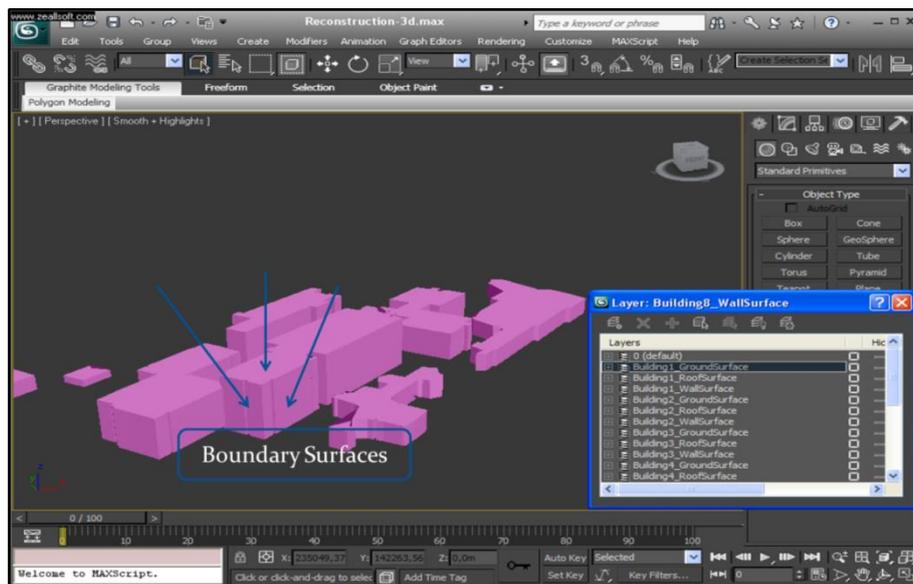


Fig5. 35. Sélection des surfaces thématiques du bâtiment ("Roof", "Ground", "Wall")

5.8.2 Traduction selon le schéma du CityGML

La modélisation 3D des bâtiments dans 3dsMax permet de créer une géométrie 3D de format Shapefile, qui est représentée en "Multi surface". Chaque surface est attribuée un nom de couche sous le format: «B<ID>_ThematicSurface» (avec "ID": identifiant numérique unique attribué à un bâtiment; "Thematic": indique le type de la surface thématique et prend les valeurs: Wall/Roof/Ground).

Bien que l'outil FME prenne en charge le format CityGML comme format de lecture et d'écriture, la traduction entre le format source qui est le Shapefile et le format CityGML ne peut pas être automatique. Sans spécification du niveau de détail à travers l'attribut «citygml_lod_name», la traduction renvoie tous les objets vers une seule classe générique "GenericCityObject", avec par défaut un niveau "Lod4Geometry". Ainsi, la traduction doit être supervisée dans l'interface graphique de Workbench pour convertir les données selon les spécifications du schéma CityGML et ce, grâce à une série de transformateurs. Les types de données d'entrée et de sortie sont définis par les «Feature Types». FME se base sur le schéma de base du jeu de données d'entrée pour définir les «Feature Type». Par exemple, dans le format Shapefile, chaque fichier représente un «Feature Type». Tandis que pour les

formats "dgn" et "dwg", la notion de «*Feature Type*» correspond à la couche, dont le nom est attribué à l'attribut «*fme_feature_type*» qui doit être activé au cours de la traduction.

Chaque surface de la géométrie "MultiSurface" est porteuse d'un identifiant du bâtiment auquel elle appartient ainsi qu'un type thématique attribué à cette surface (en l'occurrence *RoofSurface*, *GroundSurface*, *WallSurface*). Ces informations sont récupérées via des transformateurs. La valeur de l'ancien identifiant est récupérée dans un nouvel attribut nommé «*gml_id*». Pour ce faire, les transformateurs: «*AttributeSplitter*»; «*ListIndexer*»; «*AttributeRenamer*» sont utilisés (Fig5.36).

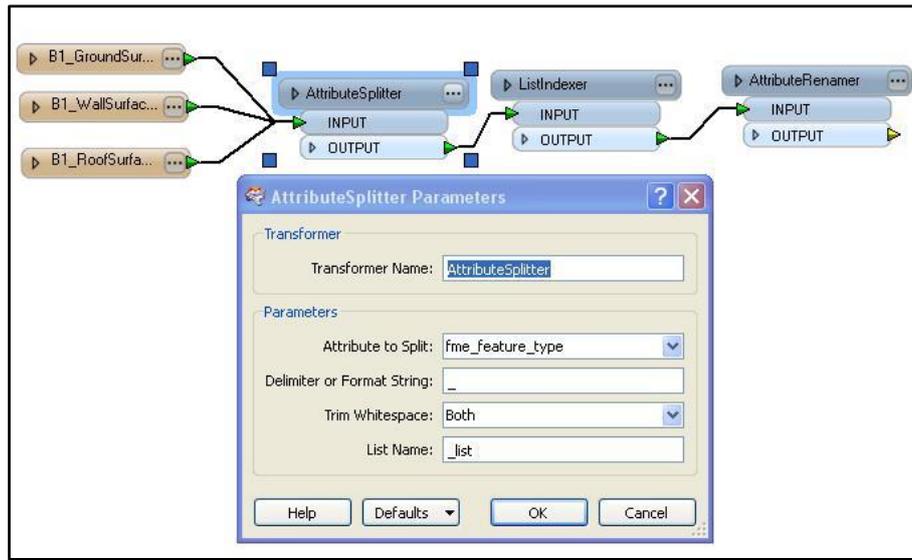


Fig5. 36. Transformateurs: «*AttributeSplitter*», «*ListIndexer*» et «*AttributeRenamer*»

Les deux transformateurs «*ListIndexer*» et «*AttributeRenamer*» sont repris pour extraire les types de surfaces (Wall/Ground/Roof) et leur attribuer le nom d'attribut: «*_surfaceType*». Après l'application de ces transformateurs, deux attributs sont créés pour chaque couche du fichier source:

- L'attribut: «*gml_id*» qui représente l'identifiant du bâtiment
- L'attribut: «*_surfaceType*» qui indique le type de surface associée au bâtiment (Ground/Roof/Wall)

Pour la reconstruction de la géométrie selon le schéma du CityGML, FME est outillé avec des transformateurs géométriques qui sont utilisés pour construire la géométrie "Solid". Notamment, le transformateur «*Aggregator*» permet de regrouper les surfaces ayant le même nom d'identifiant «*gml_id*» pour les associer à un bâtiment (Fig5.37). La géométrie "Solid" est stockée dans un fichier de sortie ("Writer") dans FME, auquel on attribue le format CityGML et un «*Feature type*» portant le nom "*Building*".

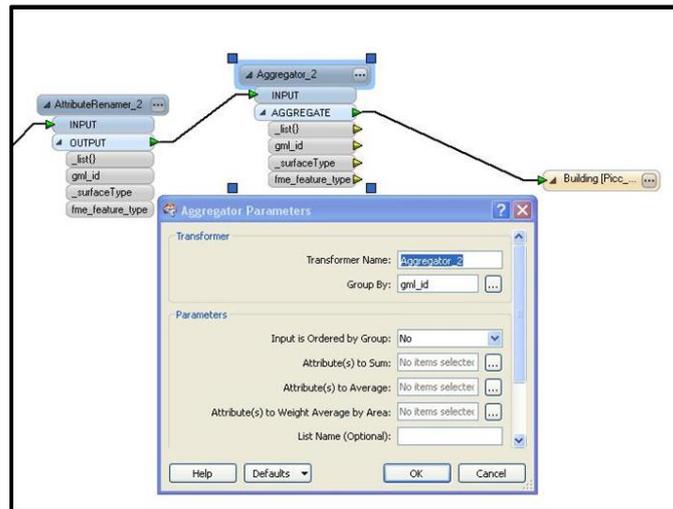


Fig5. 37. Agrégation sur base de l'identifiant «gml_id»

Le transformateur «Deaggregator» permet de séparer les surfaces thématiques «RoofSurface», «GroundSurface» et «WallSurface». Pour que FME puisse interpréter correctement les géométries multiples associées à une entité, chaque composant géométrique doit être attribué un « Trait de Géométrie » qui identifie le rôle associé à la géométrie qui est spécifié par l'attribut «Citygml_lod_name». Les valeurs valides pour cet attribut sont reportées dans le tableau 5.10. En plus de l'attribut «Citygml_lod_name» auquel on associe la valeur "lod2MultiSurface", on ajoute un autre attribut «Citygml_feature_role» auquel on attribue la valeur "boundedBy" (Fig5.38)

CityGML Feature Type	Citygml_lod_name
BuildingInstallation	Lod[2-4]Geometry
RoofSurface WallSurface GroundSurface ClosureSurface FloorSurface InteriorWallSurface CeilingSurface	Lod[2-4]MultiSurface
GenericCityObject	Lod[0-4]Geometry Lod[0-4]TerrainIntersection
Address	MultiPoint
Building BuildingPart	Lod[1-4]Solid Lod[1-4]MultiSurface Lod[2-4]MultiCurve Lod[1-4]TerrainIntersection

Tab5. 10. Les rôles géométriques «Citygml_lod_name» associés aux entités «CityGML Feature Type»

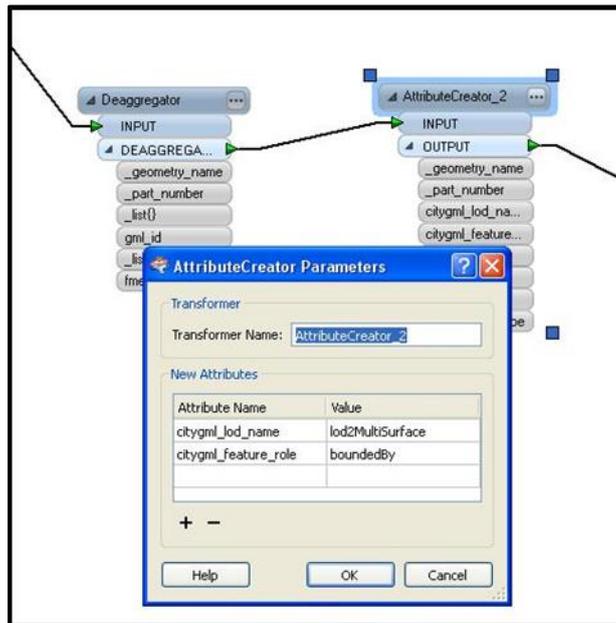


Fig5. 38. Création des attributs «citygml_lod_name» et «citygml_feature_role»

Dans CityGML, la même entité peut être représentée dans plusieurs niveaux de détail. Vu que FME ne supporte pas des géométries multiples pour une entité, un agrégat de géométries est défini pour chaque type d'entités avec une seule géométrie par niveau de détail. Avec le transformateur «GeometryTraitSetter», les attributs «citygml_feature_role» et «citygml_lod_name» sont transformés en traits de géométrie. L'ancien attribut «gml_id» est renommé en «gml_parent_id» (Fig5.39). Il faut ensuite ajouter un «Feature Type» dans FME auquel on attribue le nom «BoundarySurface» avec l'option «Fanout by attribute» associée avec la valeur de l'attribut «_surfaceType». Avec cette option, les données sont enregistrées dans le même jeu de données mais réparties en différentes couches selon le type de surface thématique (Fig5.40).

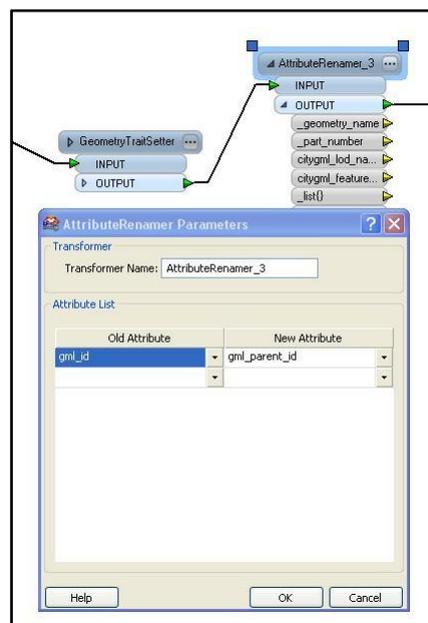


Fig5. 39. L'attribut «gml_id» renommé en «gml_parent_id»

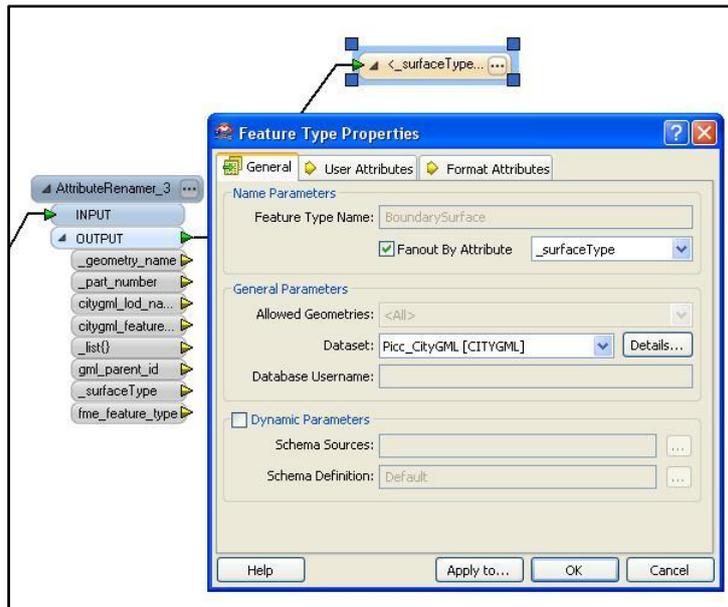


Fig5. 40. Ajout du *Writer* "Surface type" pour les surfaces thématiques

L'organigramme du processus complet de traduction vers le schéma du CityGML est présenté dans les Figures (5.41) et (5.42)

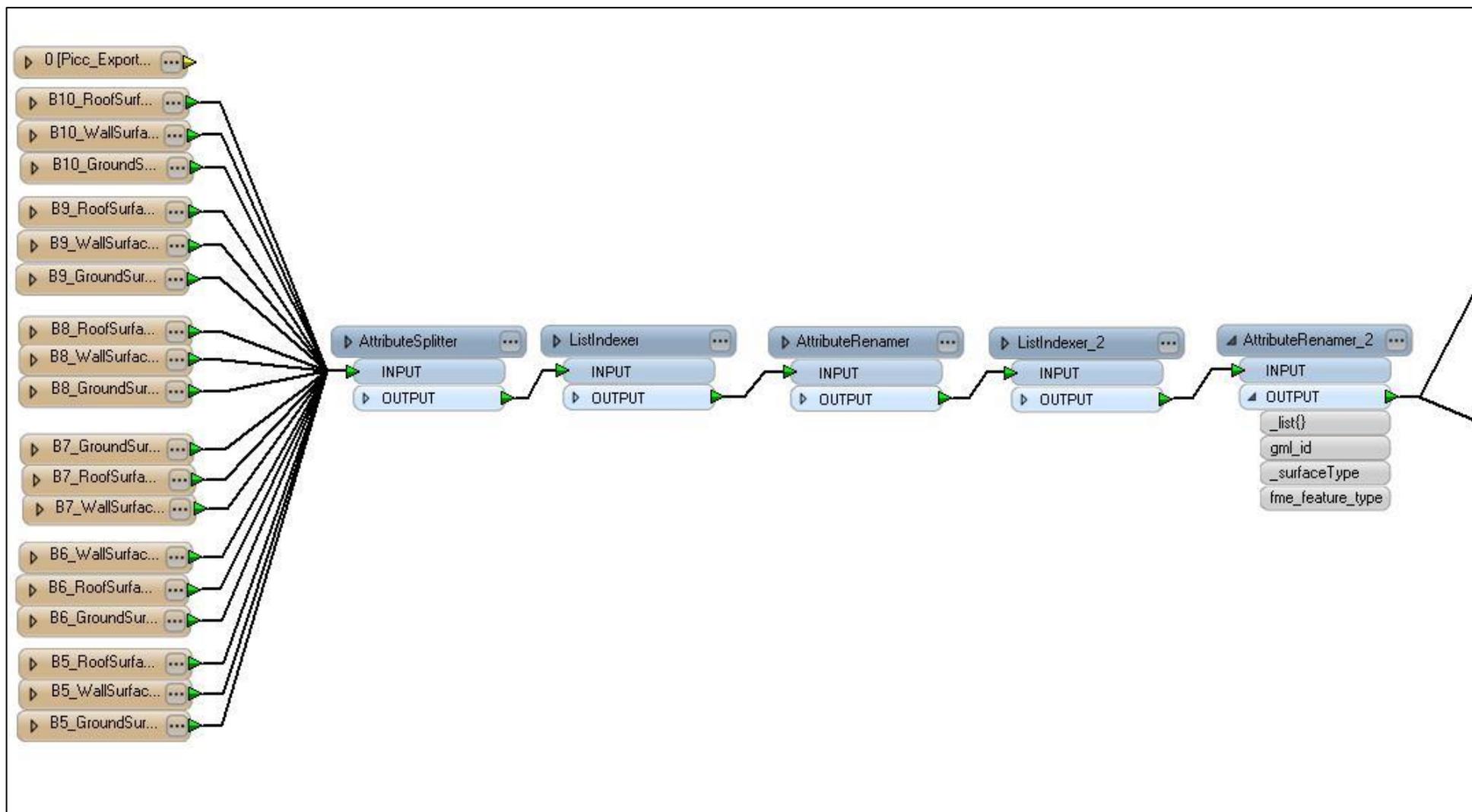


Fig5. 41. Organigramme de traduction

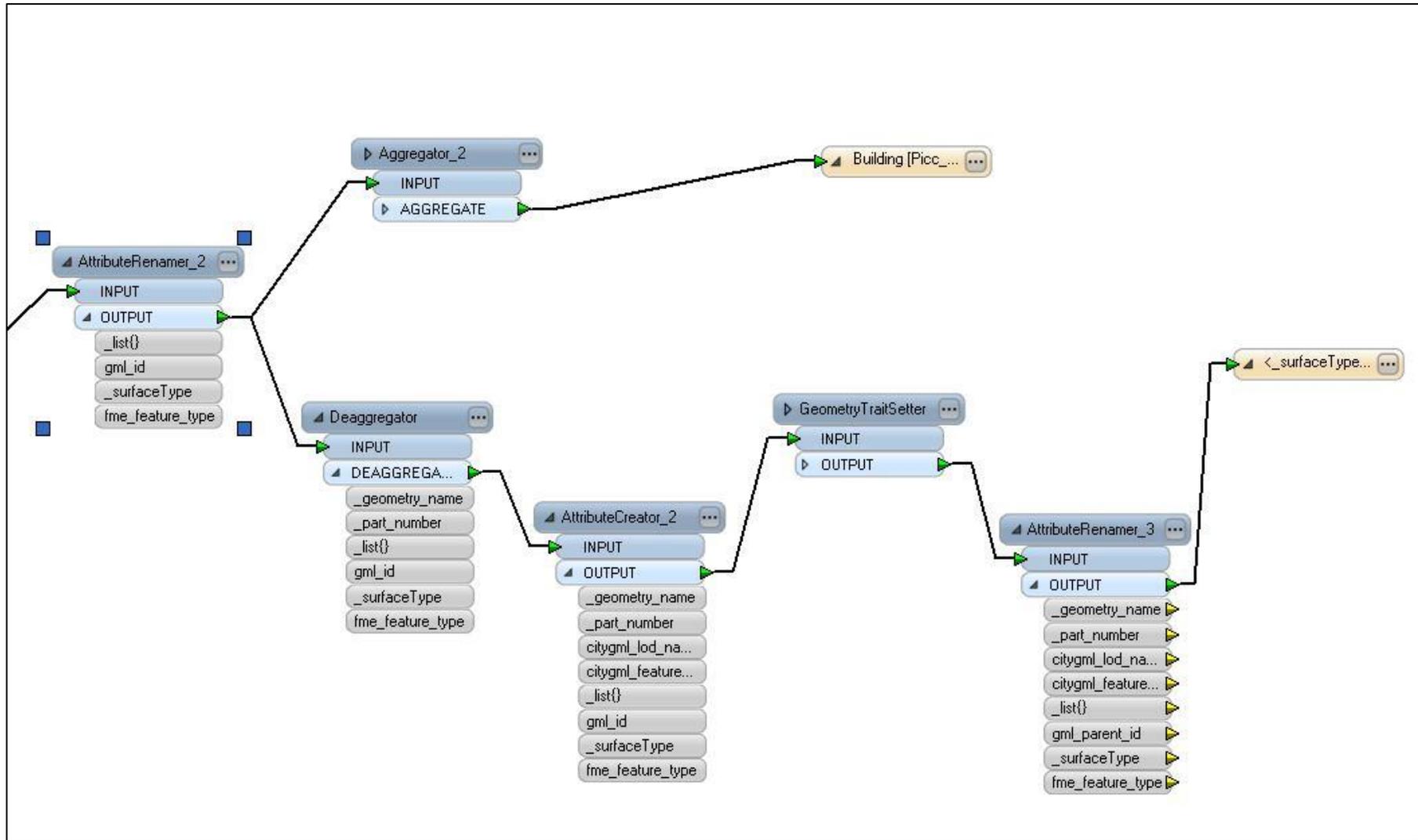


Fig5. 42. Organigramme de traduction (suite)

Le fichier CityGML résultant de la traduction est visualisé via l'outil « LandXplorer CityGML Viewer »: un outil open source pour la visualisation, le chargement, l'exploration et l'édition de modèles numériques 3D en format CityGML [2]. (Fig5.43)

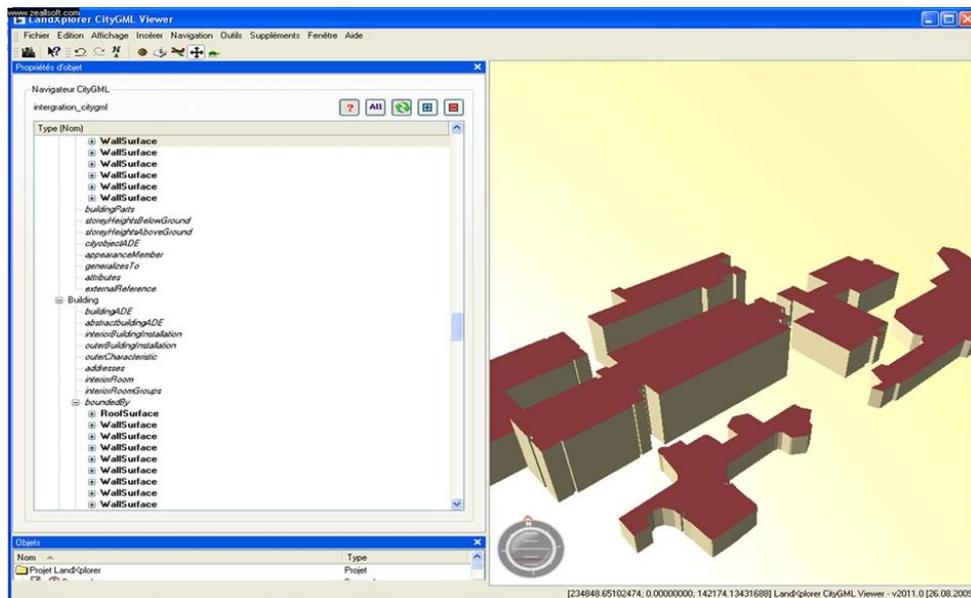


Fig5. 43. Visualisation du fichier CityGML dans « LandXplorer CityGML Viewer »

5.8.3 Import dans la Base de Données collaborative

Pour l'import du fichier CityGML dans la base de données Oracle, nous avons utilisé l'outil «CityGML importer/Exporter», un outil basé sur Java qui dispose d'une interface graphique permettant la lecture, l'écriture et la validation des fichiers CityGML. Dans l'interface graphique, il faut définir les paramètres de connexion à la base de données collaborative créée sous Oracle (Fig5.44). L'import du fichier CityGML est ensuite réalisé via la fonction Import de l'interface. Après validation du fichier par le programme, un rapport est produit indiquant les différents types d'entités qui ont été importées (Fig5.45).

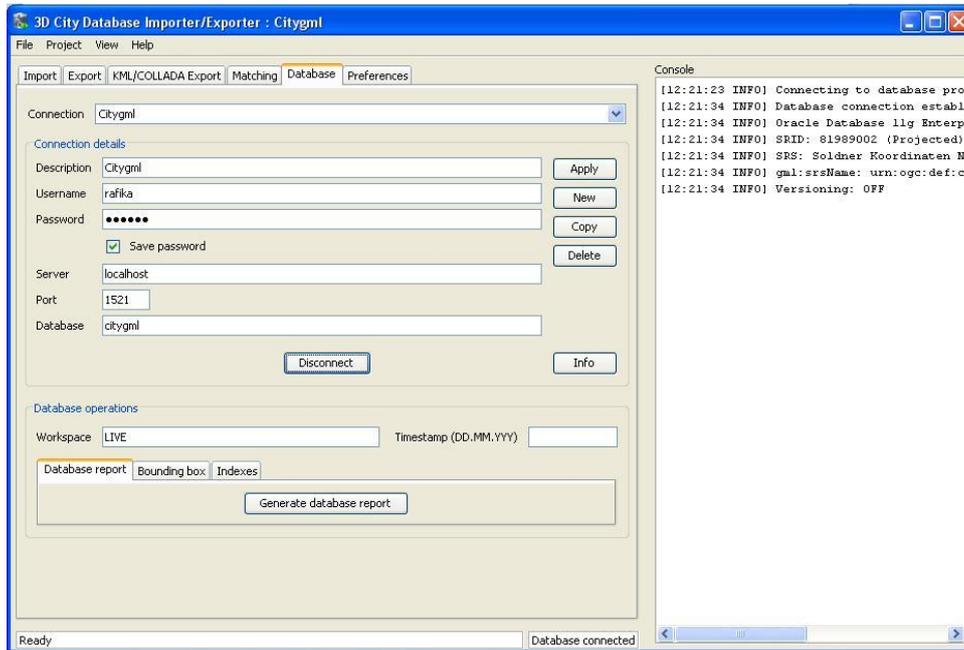


Fig5. 44. Connexion à la base de données

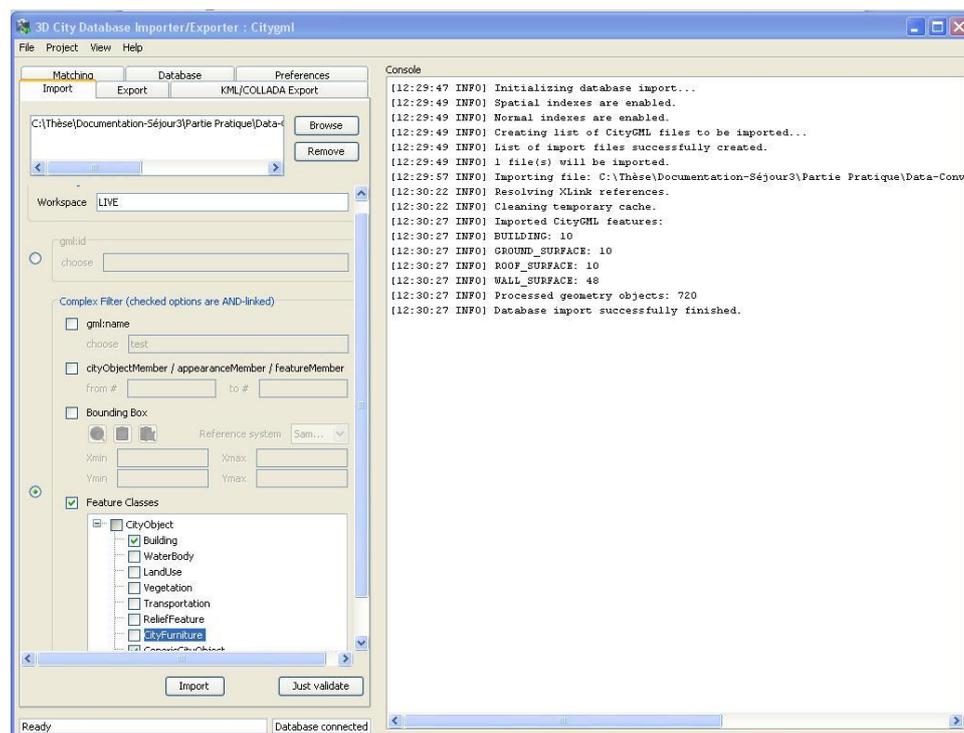


Fig5. 45. Import du fichier CityGML dans la base de données

5.9 Conclusion

La composante technique du SIG 3D collaboratif requiert la définition d'un modèle de données 3D commun ainsi que la définition d'un processus d'intégration des données multi sources permettant de fusionner l'information répartie et lui faire subir un reengineering pour répondre aux spécifications du schéma cible de la base de données collaborative qui implémente le modèle 3D commun.

L'intégration d'informations hétérogènes, incomplètes et présentant des imperfections est une tâche qui engendre un travail consistant dont la complexité augmente avec la taille des données à traiter. La grande difficulté provient des conflits qui peuvent exister entre les bases de données et qui sont dus à des hétérogénéités de définition, à des erreurs de saisie et des imperfections dans les données. La réconciliation de ces conflits demande une connaissance des spécifications définies pour chaque base.

Nous avons déjà noté que la nature du projet nécessite un travail de collaboration de tous les partenaires en vue d'une définition coopérative des besoins et des solutions à entreprendre. La présente recherche est une contribution individuelle qui vise à mettre le projet dans un cadre pratique en focalisant sur certains aspects techniques que nous avons analysés et pour lesquels nous avons proposé certaines solutions. Nous ne prétendons pas avoir répondu à toutes les questions techniques, mais le travail réalisé apporte une contribution importante qui cerne la problématique technique et met en évidence à travers des tests les problèmes qui se posent dans un cadre collaboratif et avance des propositions pour les résoudre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution en deux parties. Dans la première partie, nous avons analysé les besoins existants en termes de représentation de l'information géométrique et sémantique sur le bâtiment que nous avons extrapolés sur notre cadre de recherche en les rattachant au contexte de la 3D. Nous avons également analysé les spécifications requises en matière d'interopérabilité des données 3D. Le standard CityGML ainsi que les sollicitations définies par la norme européenne INSPIRE pour l'objet bâtiment ont été étudiés pour proposer un modèle 3D collaboratif qui soit interopérable. La deuxième partie du chapitre a été centrée sur l'intégration des données provenant des trois organismes : PICC, AGDP et IGN dans la base de données collaborative. Nous avons défini une approche d'intégration en deux étapes qui consistent en une fusion d'information géométrique et sémantique puis une traduction des données fusionnées vers le schéma du standard CityGML.

Finalement, notre contribution permet de mettre le projet SIG 3D dans un cadre pratique en étudiant sa composante principale qui concerne la modélisation d'une base de données collaborative dans laquelle les bâtiments sont représentés en 3D. Le schéma de la base de données collaborative a été défini sur base des spécifications du standard CityGML qui s'impose comme une recommandation de la directive INSPIRE. La première version de la base de données a été centrée sur la récupération de l'information existante et son reengineering pour intégration dans un seul système.

6.1 Introduction

Ce chapitre reprend les travaux menés dans le cadre de cette thèse sous forme d'un bilan qui porte sur les aspects de la recherche que nous avons étudiés et sur notre apport par rapport au SIG 3D collaboratif. A l'issue de ce bilan, nous ressortissons les points forts et nous notons les insuffisances en proposant des perspectives pour apporter des améliorations à notre recherche.

6.2 Bilan

Dans ce bilan, nous distinguons deux aspects fondamentaux qui ont été développés dans le cadre de cette recherche: le cadre conceptuel et le cadre technique du SIG 3D collaboratif. Ainsi, nous récapitulons les aspects suivants: le concept de SIG 3D collaboratif, sa composante conceptuelle en termes de démarche de conception du système et de choix du modèle 3D collaboratif et sa composante technique qui porte sur la procédure d'intégration des données dans la base de données collaborative.

6.2.1 L'aspect conceptuel

6.2.1.1 Le concept de SIG 3D collaboratif

Dans un contexte de participation, le SIG est généralement vu comme une infrastructure technique utilisée avec d'autres systèmes de communication pour prise de décision collective sur le territoire, que ce soit à l'échelle d'un groupe d'experts ou au sein d'une communauté plus large impliquant un public non professionnel. La littérature du domaine adopte deux concepts qui valorisent la dimension sociale du SIG: le SIG participatif et le SIG collaboratif qui placent la priorité dans l'approche pratique du SIG au service de la participation ou de la collaboration.

La vision du SIG comme outil de collaboration qui recentre sur ses fonctionnalités techniques est trop réductrice. En effet, les défis qui se posent dans le contexte général de l'information géographique en termes de modélisation, de coût d'appropriation, de mise à jour des référentiels géographiques, d'échange et d'interopérabilité, imposent de réfléchir le SIG dans un environnement global basé sur la collaboration. Ainsi, nous avons proposé une nouvelle vision autour du concept de SIG collaboratif dans laquelle nous valorisons la collaboration en l'impliquant dans tout le processus de mise en place d'un SIG. Particulièrement, par SIG 3D collaboratif, nous nous entendons un SIG 3D conçu dans un cadre de collaboration entre professionnels qui vise un objectif général qui consiste à mettre en place une solution commune servant de cadre de collaboration future dans les projets à dimension spatiale et un objectif spécifique centré sur la production d'une donnée 3D standardisée et cohérente à l'échelle d'un espace géographique donné. Le SIG 3D collaboratif permet de mettre en amont les questions qui se rattachent à l'information 3D pour s'affranchir des problèmes futurs de discordances et d'incohérences techniques et sémantiques et ce, à travers la co-définition d'une donnée spatiale 3D interopérable et la conception collaborative du système

dans un cadre de partage des ressources, du savoir-faire, du coût d'acquisition et de mise à jour des données spatiales tridimensionnelles.

6.2.1.2 La démarche de conception

L'insuffisance des connaissances dans le domaine de la 3D ainsi que l'absence d'une approche générique pour concevoir des solutions géomatiques 3D interopérables imposent la mise à disposition d'un cadre méthodologique adapté qui aborde les questions conceptuelles et techniques du SIG 3D collaboratif. En effet, les méthodes classiques de conception d'applications géomatiques répondent à la question sur des objectifs prédéfinis pour une seule organisation en énumérant les étapes nécessaires pour leur accomplissement, alors que le SIG 3D collaboratif requiert une co-définition d'objectifs communs et un travail de conception collaborative qui cible une organisation «abstraite» représentant plusieurs organisations.

Le SIG 3D collaboratif place l'activité de conception dans un cadre particulier centré sur la collaboration. La conception collaborative requiert un cadre de communication structuré. Elle doit s'appuyer sur une démarche, définir un référentiel géographique commun pour les données 3D et utiliser des techniques de communications ainsi que des outils d'aide au travail collaboratif.

Nous avons proposé, dans le cadre de cette recherche, une démarche conceptuelle générale pour mise en place d'un SIG 3D collaboratif. Dans la démarche proposée, nous avons adopté une approche qui valorise le processus dans le sens où la collaboration est considérée comme un processus évolutif dont les objectifs et les réalisations ne sont pas forcément immédiats. Nous avons ainsi considéré deux versions de développement du SIG 3D collaboratif:

- une version d'implantation qui vise à intégrer les connaissances existantes pour alimenter une version initiale du SIG 3D collaboratif ;
- une version d'évolution qui représente l'évolution future du SIG 3D collaboratif. Elle concerne les perspectives de développement de la solution par l'intégration d'autres informations externes en vue d'alimenter la base de données 3D de référence.

En résumé, la méthode de conception du SIG 3D collaboratif que nous avons proposée s'appuie sur des principes, propose une démarche méthodologique ainsi que des outils de support pour la définition, la conception et l'évaluation du système. Nous avons choisi de présenter ces composantes dans le cadre d'une démarche intégrée dans laquelle les étapes sont regroupées par catégories d'activités. Nous avons proposé un cadre méthodologique flexible permettant au concepteur d'adapter le cheminement de la démarche aux contraintes organisationnelles. Des étapes ont été proposées pour fournir une ligne directrice pour le travail de conception sans que leur ordre chronologique soit imposé.

Le point fort de notre démarche est vu à travers son aspect pragmatique dans l'étude de la question centrale de chaque étape. Par rapport aux méthodes classiques, notre démarche place le concepteur dans un cadre pratique de développement du SIG 3D collaboratif par la considération des deux aspects conceptuel et technique. La considération des questions techniques apporte une valeur ajoutée à la démarche par la proposition de directives portant sur la standardisation, la modélisation et l'échange de l'information géographique 3D. Un autre point fort de notre démarche concerne son applicabilité dans le contexte d'autres

projets collaboratifs. En effet, la plupart des questions abordées sont d'utilité pour toute action collaborative centrée sur les données spatiales. Particulièrement, la démarche garde un aspect générique applicable aux SIG collaboratifs en général.

Finalement, nous ne prétendons pas avoir offert une démarche complète et universelle, par contre, nous lui attribuons une valeur importante en tant que référence pour des professionnels voulant s'intégrer dans des actions de collaboration autour des données spatiales tridimensionnelles.

6.2.1.3 Le modèle 3D collaboratif

Une application SIG ne peut pas être universelle. Elle est généralement mise en place pour répondre à des besoins spécifiques. Cependant, dans le cas de la 3D, les besoins ne sont pas suffisamment connus. Le problème peut être contourné en partant de l'idée que des besoins pertinents peuvent être générés quand les utilisateurs auraient à disposition un produit 3D de référence.

Le standard CityGML et les sollicitations de la directive INSPIRE constituent deux jalons importants dans le domaine de l'interopérabilité des modèles 3D urbains. CityGML a été adopté par l'OGC en tant que standard international pour la modélisation 3D de l'espace urbain. Ce dernier définit les bâtiments en tant que structures multi géométries pouvant être représentées selon quatre niveaux de détail. Les spécifications de représentation 3D des bâtiments font également partie de la directive INSPIRE à travers la définition d'un profil 3D de base et un profil 3D étendu qui sont basés sur le standard CityGML. Le choix du CityGML pour notre modèle 3D se justifie par son interopérabilité, sa modélisation multi-échelle ainsi que sa richesse sémantique, comparé à d'autres standards ou formats 3D.

Dans les données sources, les bâtiments sont représentés par une géométrie 2D augmentée par une information implicite sur la hauteur. Nous avons conçu notre modèle de façon à réutiliser ces données en leur appliquant un processus de reengineering, sans imposition de l'acquisition de nouvelles données 3D. Ainsi, nous avons attribué à notre modèle un niveau de détail Lod1.5 comme solution intermédiaire entre le Lod1 et le Lod2 qui sont définis dans CityGML. Selon ce niveau, nous représentons le bâtiment en géométrie solide et multi surfaces en distinguant ses surfaces thématiques. L'information attributaire des bâtiments a été définie sur base des besoins exprimés dans le cadre d'un groupe de travail qui vise la définition d'un modèle d'échange pour le bâtiment selon les recommandations de la norme INSPIRE. Quoique les besoins exprimés ne visent pas la représentation en 3D des bâtiments, nous les avons extrapolés dans notre contexte pour les rattacher à la géométrie 3D. Ainsi, cette géométrie a été associée avec des attributs sur l'identifiant, la fonction, l'usage et le statut précisant le stade de vie du bâtiment.

En ce qui concerne la modélisation logico-physique, nous avons adopté le modèle Objet Relationnel et nous avons choisi le SGBD Oracle pour l'implémentation de la base de données collaborative. Nous avons utilisé Oracle pour deux raisons principales: ses performances reconnues pour le stockage, l'indexation et la gestion des données 3D et son interopérabilité avec le standard CityGML à travers la disponibilité de solutions pour la création d'instances Oracle compatibles avec CityGML, notamment la base de données Open source «3DCityDatabase» ainsi que des outils d'intégration des fichiers CityGML dans une base de données Oracle.

6.2.2 L'aspect technique

Dans le cadre de cette recherche, notre contribution a porté sur la mise en place d'un cadre pratique qui se rattache au contexte théorique du SIG 3D collaboratif. En effet, nous avons réalisé un projet pilote que nous avons placé dans le contexte de la production des données de référence sur le bâtiment en Belgique-région wallonne. Nous avons conçu et testé un processus d'intégration des données provenant de trois organismes : l'IGN ; l'AGDP ; le SPW pour alimenter une base de données 3D centralisée basée sur le standard CityGML.

Les données sources proviennent de trois bases de données de qualités différentes. Les informations sont réparties et incomplètes. Il a fallu les mettre en cohérence et les intégrer dans la base de données 3D collaborative dans le cadre d'un processus général d'intégration d'information.

Parmi les stratégies d'intégration, nous avons adopté l'approche mono-représentation qui consiste à fusionner les informations réparties et à éliminer les redondances en vue de produire une information centralisée. Nous avons proposé un processus général d'intégration des bases de données en deux grandes étapes :

- La première étape consiste à produire une couche d'information intégrée par la mise en correspondance des différentes bases et la réconciliation des conflits géométriques et sémantiques. Le schéma de la couche intégrée a été défini pour être conforme aux spécifications sémantiques du modèle collaboratif.
- La deuxième étape du processus consiste à traduire le schéma spatial de la couche intégrée selon les spécifications du schéma géométrique du standard CityGML.

6.2.3.1 Etape 1: L'intégration des BD

Cette première étape d'intégration a été réalisée à travers une pré-intégration; une déclaration des correspondances et l'intégration proprement dite par fusion d'information.

- **La pré-intégration**

L'étape de pré-intégration a consisté en une préparation des bases de données à travers l'étude des spécifications, l'uniformisation des projections, des corrections géométriques et topologiques ainsi que le relevé des conflits d'intégration en adoptant la taxonomie des conflits proposée par Devogele (1996).

Les bases de données présentent une hétérogénéité de nature sémantique (choix terminologiques différents) et schématique (structuration de l'information selon des schémas conceptuels différents). L'étude des spécifications de saisie et de qualité qui régissent le contenu des bases de données et leur attribuent une certaine granularité nous a permis de définir l'approche à adopter dans l'étape de déclaration des correspondances entre les instances des trois bases, et d'interpréter certains conflits identifiés lors de cette étape.

- **L'appariement**

L'appariement est un processus qui revêt une grande complexité dans le domaine de l'information géographique. Il est basé sur l'évaluation de l'écart entre une ou plusieurs propriétés de deux objets potentiellement homologues, en se basant sur certains critères géométriques, topologiques ou sémantiques. Nous l'avons utilisé pour deux objectifs :

- Le premier objectif consiste en une extraction d'information sémantique de la base de données de l'AGDP (base de comparaison) en vue de la transférer sur la position géométrique des données de la base du PICC (base de référence).
- Le deuxième objectif vise une mise à jour de la base de données du PICC (base de référence) à partir de la base de l'IGN (base de comparaison) qui est caractérisée par une bonne qualité temporelle.

En termes d'approche d'appariement, nous avons opté pour une «intégration d'approches», à travers un mariage entre l'approche de Belhadj (2001) et celle proposée par Abadie (2012). Le critère géométrique est représenté par la distance surfacique ou la fonction d'inclusion. Le critère sémantique a été ajouté comme source d'information supplémentaire au critère géométrique. Les tests d'appariement ont été réalisés en spécifiant des seuils pour la recherche des candidats et en variant les paramètres associés au critère géométrique et au critère sémantique en vue d'étudier leur impact.

Nous avons opté pour un alignement sémantique entre les schémas des bases de données à appairer en s'appuyant sur la mesure de distance sémantique de Wu-Palmer. Pour ce faire, nous avons créé, pour chaque base de données, une ontologie (ou une taxonomie) à partir de l'extraction des concepts figurant dans les schémas. Nous avons utilisé comme ontologie de support, la taxonomie des concepts topographiques établie dans le cadre de la thèse de (Abadie, 2012). L'alignement des schémas a permis d'affecter un indice de similarité sémantique entre concepts, qui a été introduit comme critère supplémentaire au critère géométrique (distance surfacique) dans l'algorithme d'appariement.

Pour la qualification des liens d'appariement obtenus, nous avons procédé à une inspection visuelle des résultats que nous avons renforcée par une évaluation quantitative utilisant les concepts de précision et de rappel.

En résumé, les tests d'appariement effectués et leur évaluation nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- la variation des seuils associés aux paramètres géométrique et sémantique n'introduit pas un changement significatif des résultats d'appariement. Ce qui s'explique par l'importance du taux d'inclusion entre objets candidats qui atteint 80% et la proximité sémantique entre les concepts appariés.
- l'application stricte du critère sémantique comme paramètre combiné avec le critère géométrique a généré des liens invalides. Nous avons proposé à ce qu'il soit introduit a posteriori comme paramètre de décision, après un filtrage préalable des résultats de l'appariement géométrique.
- l'application de la fonction d'inclusion comme le seul paramètre géométrique de sélection des candidats est insuffisante. Il est recommandé d'introduire un paramètre sur le rapport des surfaces entre l'objet de référence et plusieurs candidats à l'appariement pour pallier à une génération éventuelle de faux liens de type [1-n] dus à une segmentation des objets dans les deux bases.
- Dans le cas de différence de segmentation (cas PICC-AGDP), un traitement préalable des jeux de données pour fusion des objets connexes pourrait réduire le nombre des liens d'appariement invalides et améliorer ainsi la qualité de la détection.
- la considération du seul critère géométrique a donné des résultats satisfaisants dans le cas de l'appariement PICC-IGN avec une précision de la détection de 97%. L'écart du

niveau de détail entre les deux bases a significativement réduit le nombre des liens multiples.

- **L'intégration**

Dans cette étape, nous avons considéré les liens résultants du filtrage comme des liens «certains» pour analyser leur cardinalité en vue d'une fusion d'information. Tandis que les liens invalides ou non sûrs n'ont subi aucun traitement particulier, vu l'indisponibilité d'une source d'information supplémentaire. Nous avons considéré deux types d'analyses conformément aux objectifs prédéfinis pour l'appariement et qui consistent en une fusion d'information sémantique et une mise à jour des données géométriques.

Nous avons procédé à une fusion d'information sur base de l'analyse des cardinalités des liens établis dans le processus d'appariement entre la base de données du PICC et celle de l'AGDP (Partie 5.7.2.3). L'information sémantique est transférée sur la position géométrique de la base de données de référence selon la cardinalité des liens trouvés. Dans ce contexte, nous avons soulevé la difficulté d'interpréter les liens multiples pour lesquels nous avons fait des hypothèses qu'il faut valider par le recours à d'autres sources d'information.

D'autre part, l'analyse de l'appariement entre la base de données de référence (PICC) et la base de données de comparaison (IGN) a présenté un intérêt particulier dans la détection des évolutions géométriques intervenues dans la base de référence (Partie 5.7.2.3). Nous avons pu extraire des mises à jour géométriques grâce au processus d'appariement. Nous avons également relevé des cas de liens où la décision pour extraction des mises à jour n'est pas triviale.

En résumé, l'analyse des résultats d'appariement nous permet de conclure que le processus d'appariement ne peut pas être automatique et que le recours à des sources d'information externes est primordiale pour prise de décision sur la fusion de l'information.

6.2.3.2 Etape 2: La traduction vers le schéma du CityGML

Un processus de traduction entre le schéma géométrique de la base résultant de la première étape d'intégration qui de type 2.5D et le schéma géométrique du CityGML de type 3D a été réalisé à travers deux étapes :

- une interpolation des hauteurs des bâtiments et une reconstruction de la géométrie 3D;
- un processus de mapping entre le schéma intégré et le schéma géométrique du CityGML.

L'interpolation des hauteurs a été réalisée à travers une génération d'un modèle numérique de terrain et un modèle numérique des corniches des bâtiments par extraction des hauteurs minimale et maximale et déduction d'une hauteur approximative pour chaque bâtiment. Celle-ci a été ajoutée en tant qu'attribut dans la base de données. Les bâtiments ont été extrudés dans l'outil FME sur base de l'attribut hauteur puis modélisés en 3D dans le logiciel 3dsMax selon les surfaces thématiques du CityGML: «*WallSurface*», «*GroundSurface*» et «*RoofSurface*» qui ont été attribuées à des couches différentes. La modélisation 3D des bâtiments dans 3dsMax a permis de créer une géométrie 3D de format Shapefile, qui est représentée en "Multi surface".

Pour la traduction entre le format source qui est le Shapefile et le format CityGML, nous avons utilisé l'outil FME qui prend en charge le format CityGML. Nous avons opté pour une traduction supervisée pour convertir les données selon les spécifications du schéma CityGML et ce, grâce à une série de transformateurs. Le résultat a été importé dans la base de données 3D en utilisant l'outil Open source «CityGML importer/Exporter», développé pour Oracle pour l'import et la validation des fichiers CityGML.

6.3 Perspectives

Comme nous l'avons signalé à plusieurs reprises dans ce rapport, la mise en pratique d'un SIG 3D collaboratif requiert un travail de collaboration entre plusieurs partenaires. Nous avons balisé le chemin pour sa mise en place en avançant des réflexions et en proposant une démarche conceptuelle et des solutions portant sur certains aspects techniques. Cependant, notre travail comporte certainement des limites, des défaillances et des perspectives d'amélioration. Dans cette partie, nous discuterons des limites du travail et ferons part des recommandations qui pourraient l'améliorer.

6.3.1 Perspectives conceptuelles

Nous avons réfléchi le modèle 3D collaboratif pour le thème bâtiment en se référant aux données disponibles en termes de granularité de l'information 3D pouvant être obtenue et aussi en visant un modèle 3D basique pour atténuer la complexité du standard CityGML. L'évolution future des besoins et l'acquisition de nouvelles données 3D pourraient donner lieu à une révision du modèle 3D pour représentation des bâtiments selon des niveaux de détail supérieurs (Lod3 et Lod4).

La démarche de conception du SIG 3D collaboratif que nous avons proposée fournit une base pour entreprendre le projet. Cependant, sa mise en pratique peut donner lieu à de nouvelles idées. La question reste ouverte pour certaines améliorations. Notamment, la modélisation des étapes de la démarche par proposition d'organigrammes et de modèles conceptuels pour accompagner les étapes explicatives.

Un autre aspect conceptuel dont nous avons soulevé l'importance mais que nous n'avons pas suffisamment analysé dans notre recherche, concerne la coproduction des données 3D selon des spécifications communes, qui représente un enjeu principal de la collaboration autour d'un SIG 3D. Dans ce contexte, l'expérience acquise dans le projet pilote que nous avons réalisé peut être exploitée en termes de recommandations concernant les spécifications des données 3D à coproduire. En effet, les processus de mise à jour des référentiels géographiques doivent être orientés pour compléter l'information requise pour améliorer la granularité de la représentation des bâtiments en permettant des niveaux de détail supérieurs, notamment l'acquisition des données concernant l'architecture du bâtiment. Un accord sur les techniques d'acquisition et les spécifications de saisie, de sélection et de qualité géométrique et sémantique est recommandé pour coproduire une donnée 3D cohérente.

6.3.2 Perspectives techniques

Dans l'étude des questions techniques, nous avons centré notre travail sur les aspects de modélisation 3D, de choix du SGBD et du standard pour représenter les bâtiments en 3D. L'intégration des bases de données existantes dans une base de données 3D centralisée a

été au cœur de notre contribution. Nous proposons de revoir ces éléments en invoquant des perspectives pour les améliorer ou pour tester de nouvelles solutions.

Le SGBD

Comparé au SGBD PostgreSQL, Oracle est connu pour ses fonctionnalités avancées en 3D. Il est recommandé pour la gestion de données 3D présentant une géométrie complexe et aussi pour entreprendre des requêtes spatiales nécessitant une grande rapidité d'exécution, surtout dans le cas où le niveau de détail est important.

Au début de notre travail, nous avons étudié la possibilité d'utiliser PostgreSQL pour le stockage de la base de données collaborative, mais nous étions contraints par l'indisponibilité, à ce temps, d'outils pour intégration de fichiers CityGML dans une base de données PostgreSQL. Nous avons voulu nous abstenir de tout développement technique à intérêt ponctuel, surtout que la communauté de développement de PostgreSQL est très active et que ces développements étaient annoncés. Ainsi, nous avons choisi de faire les tests avec le SGBD Oracle et des outils Open source développés pour intégration de fichiers CityGML dans une base de données Oracle. Aujourd'hui, ces mêmes outils sont disponibles pour PostgreSQL et il est utile de les tester pour évaluer leur apport dans l'interopérabilité avec le standard CityGML, surtout que PostgreSQL a l'avantage d'être libre et largement utilisé.

Le standard 3D

Le choix s'est porté sur le standard CityGML pour la définition de la structure des bâtiments à stocker dans la base de données collaborative. Ce choix a été fixé pour répondre aux exigences en interopérabilité. CityGML, malgré sa complexité, s'impose comme standard de modélisation 3D. Nous l'avons adopté en choisissant un niveau de détail intermédiaire entre le Lod1 et le Lod2 qui tient compte de la granularité des données disponibles.

Dans l'avenir, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour la représentation des bâtiments en 3D selon les quatre niveaux de détail du CityGML. Pour des questions de coût, les bâtiments ordinaires peuvent être représentés en Lod1 ou Lod2 tandis que les bâtiments remarquables (bâtiments historiques, bâtiments religieux, etc.) peuvent être modélisés avec plus de détails (Lod3 ou Lod4).

La relation entre CityGML et d'autres standards comme IFC doit être exploitée. Plusieurs recherches ont étudié la conversion entre ces deux formats, à travers un mapping entre leurs ontologies. Ceci revêt une utilité dans l'intégration de modèles IFC dans la base de données collaborative.

Les sources 3D

En termes de formats de données à intégrer dans la base de données collaborative, nous nous sommes limités à l'intégration du format Shapefile qui est le format le plus fréquent pour la représentation des données dans les référentiels géographiques ou cartographiques. Pour multiplier les sources d'entrée, l'intégration devrait être étendue à d'autres types de formats tels que: les formats CAO (dxf, dwg, dgn); le format SKP de Sketchup, le format Multi patch d'Esri, le format dae de COLLADA, etc. L'ensemble de ces formats est pris en charge par l'outil FME et le processus de traduction vers le format CityGML devrait être similaire à celui adopté pour la traduction du format Shapefile.

Bon nombre de modèles 3D sont créés dans le cadre de projets d'aménagement. Ils sont généralement utilisés pour des fins de visualisation et de vulgarisation. Il serait alors opportun d'en tirer profit et les intégrer dans la base de données 3D de référence. Cependant, ces modèles à intégrer doivent être traduits en format CityGML et être conformes en termes de qualité à la base de données 3D de référence.

L'intégration d'autres sources de données produites par crowdsourcing pourrait être envisageable dans le futur. Des portails peuvent être utilisés en proposant une formalisation des spécifications de saisie pour assurer la conformité des contributions avec le modèle 3D de référence. La mise en place d'outils de signalement d'erreurs, d'évolutions ou d'omissions sur des plateformes web permettrait au grand public de participer à la mise à jour du modèle 3D à l'instar des contributions dans l'application OpenStreetMap 3D. Une stratégie d'évaluation et de réconciliation des contributions afin de les intégrer d'une façon cohérente au contenu de la base de données centralisée est requise.

La procédure d'intégration

Dans la procédure d'intégration, nous avons défini les étapes requises pour intégration de plusieurs bases de données portant sur le même espace géographique et la transformation des schémas selon le standard CityGML. Le processus proposé dans le cadre de notre recherche a été testé dans un cadre spécifique. Cependant, le raisonnement reste applicable à plusieurs contextes à condition qu'il soit adapté aux données sources. Notamment, l'approche d'appariement pourrait exiger des paramètres différents pour les tests en fonction du degré d'hétérogénéité des bases de données à apparier.

Un autre aspect de l'intégration concerne les données qui seraient disponibles en 3D. Dans le futur, la multiplication des sources d'entrée pour ces données demanderait une procédure d'intégration prenant compte des trois dimensions de l'espace. L'appariement et la gestion des conflits dans le cas des données 3D représentées selon des niveaux de détail différents apportera un autre degré de complexité au problème d'intégration.

CONCLUSION GENERALE

Les SIG 3D sont les outils les plus appropriés pour la gestion des données géo référencées dans un espace tridimensionnel. Malgré les progrès enregistrés en matière de fonctionnalités techniques, les solutions SIG 3D commerciales n'atteignent pas encore le niveau requis en matière de gestion optimale de la troisième dimension. Du côté développement, les SIG 3D engendrent des contraintes conceptuelles dues à l'absence d'une approche générique de conception de solutions 3D, d'une part, et à l'incapacité des organismes à prendre en charge la totalité du processus de production et de mise à jour de référentiels 3D, d'autre part. Ces contraintes peuvent être solutionnées par collaboration entre plusieurs organismes intervenant sur un même espace géographique en vue de partager les coûts, les ressources et les expériences dans un cadre interopérable.

Nos travaux de thèse se sont inscrits dans le contexte des SIG et de la collaboration. Contrairement à ce qui existe dans la littérature du domaine, où le SIG collaboratif est vu comme outil de collaboration, notre vision considère le SIG collaboratif comme produit de collaboration que nous avons étudié dans le contexte spécifique de la 3D. Le SIG 3D collaboratif a été proposé comme solution potentielle développée par plusieurs organismes dans un cadre collaboratif, en vue de concevoir une solution interopérable visant à s'affranchir des problèmes de coût et d'interopérabilité technique et sémantique.

Le SIG 3D collaboratif est un système multidimensionnel comportant une composante conceptuelle et une composante technique qui sont étudiées selon une dimension collaborative. Ainsi, nous nous sommes intéressés à deux aspects principaux rattachés aux SIG 3D collaboratifs : une démarche conceptuelle de leur mise en place, et le problème d'intégration de données multi source dans une base de données 3D collaborative basée sur le schéma du standard CityGML.

Du côté conception du SIG 3D collaboratif, nous avons proposé une démarche méthodologique ainsi que des outils de support pour la définition, la conception et l'évaluation du système que nous avons présentés dans le cadre d'une démarche intégrée regroupant un ensemble d'étapes selon un cheminement flexible pouvant s'adapter aux contraintes organisationnelles. Ces étapes ont été proposées pour fournir un support pour le travail de conception sans qu'un certain ordre chronologique soit imposé.

Du côté conception du modèle 3D collaboratif, notre contribution a porté sur une étude exploratoire des besoins et de l'existant en termes de référentiels géographiques au niveau des trois organismes suivants: le SPW, l'IGN et l'AGDP et sur l'analyse des spécifications d'interopérabilité proposées dans le standard CityGML ou recommandées par la directive européenne INSPIRE. Nous avons proposé sur base de cette étude un modèle 3D collaboratif pour l'objet bâtiment.

Du côté intégration des données, nous avons proposé et testé un processus d'intégration complète de plusieurs bases de données en vue d'alimenter la base de données collaborative. Pour ce faire, nous avons étudié les spécifications des bases de données des trois organismes précités dans le cadre d'une étape d'intégration et nous avons procédé à un appariement des données comme processus préalable à la fusion d'information.

L'appariement a été réalisé en combinant le critère géométrique et sémantique et en variant les paramètres y associés. Les résultats ont été interprétés pour deux finalités : une extraction d'information sémantique de la base de données la plus riche et son transfert sur la position géométrique de la base de référence ainsi qu'une extraction des mises à jour géométriques à partir de la base représentant la meilleure qualité temporelle.

Vu la multiplicité des variables autour d'une solution SIG 3D collaborative, notamment les partenaires impliqués et leur apport en termes d'information spatiale, le travail réalisé ne peut pas être complet. De ce fait, plusieurs perspectives sont envisageables. Notamment, la mise en pratique de la démarche conceptuelle par l'implication effective des producteurs potentiels des référentiels géographiques. Aussi, les questions techniques d'intégration doivent considérer d'autres sources et formats de données, notamment les futures données qui seront disponibles en 3D.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abadie N. (2012) Formalisation, acquisition et mise en œuvre de connaissances pour l'intégration virtuelle de bases de données géographiques Les spécifications au cœur du processus d'intégration. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- Amelunxen C. (2010). An approach to geocoding based on volunteered spatial data. *Zipf, A. et al.: Geoinformatik*, 7-12.
- Anandarajan M. (2010). E-Research Collaboration: Theory, Techniques and Challenges. Springer (consultation en ligne).
- Arens C., Stoter J., Oosterom P.v. (2005). Modelling 3D spatial objects in a geo-DBMS using a 3D primitive, *Computers & Geosciences* 31 (2005) 165–177
- Armstrong M.P. (1994). Requirements for the development of GIS-based group decision-support systems. *Journal of the American Society for Information Science*, 45(9), 669-677.
- Badard T. (2000). Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques. Thèse de doctorat en SIG de l'université Marne-la-Vallée.
- Bakis et al. (2010), Amateurisme cartographique et géographique à l'heure du web 2.0: questionnement autour de la néogéographie *Networks and Communication Studies, NETCOM*, vol. 24 (2010), n° 1-2 pp. 109-132
- Balram S., Dragicevic S. (2006) Collaborative Geographic Information Systems, Chapter1, IGI Global. Copyright © 2006, Idea Group Inc. Copying or distributing in print or electronic forms without written permission of Idea Group Inc. is prohibited
- Balram S., Dragičević S. (2005). Attitudes toward urban green spaces: integrating questionnaire survey and collaborative GIS techniques to improve attitude measurements. *Landscape and Urban Planning*, 71(2), 147-162.
- Balram S., Dragičević S. (2006b). Modeling collaborative GIS processes using soft systems theory, UML and object oriented design. *Transactions in GIS*, 10(2), 199-218.
- Barnes M., Finch E.L., Sony Computer Entertainment Inc. (2008). COLLADA-Digital Asset Schema Release 1.5.0.
- Batty M., Hudson-Smith A., Milton R., Crooks A. (2010). Map mashups, Web 2.0 and the GIS revolution. *Annals of GIS*, 16(1), 1-13.
- Bédard K., Lachance B., Kirkwood D., Beaudoin G., Pouliot J. (2006). Développement d'un prototype de requêtes topologiques 3D et application au gîte de Cu-Ag-Pb-Zn de Transfiguration. Rapport final, 2006 Sous-projet SC20.
- Bédard Y., Caron C., Maamar Z., Moulin B., Vallière D. (1996). Adapting data models for the design of spatio-temporal databases. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(1), 19-41.
- Bédard Y., Larrivée S., Proulx M.J., Nadeau M. (2004). Modeling Geospatial databases with plug-ins for visual languages: A pragmatic approach and the impacts of 16 years of research and experimentations on Perceptory. In *Conceptual Modeling for Advanced Application Domains* (pp.17-30). Springer Berlin Heidelberg.
- Bédard Y., Pageau J., Caron C. (1992). Spatial Data Modeling: The Modul-R Formalism and CASE Technology. In *ISPRS Symposium, Washington* (pp.1-14).
- Beerli, C., Kanza, Y., Safra, E. et Sagiv, Y. (2004). Object Fusion in Geographic Information Systems. In : Proceedings of the 30th VLDB Conference, Toronto, 2004

- BelHadj A. (2001). Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques - Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques. Thèse de Doctorat, Université Marne-la-Vallée.
- Belkadi F. et al. (2004). Démarche de modélisation d'une situation de conception collaborative, Document numérique, 2004/1 Vol.8, p.93-106. DOI: 10.3166/dn.8.1.93-106
- Belkadi F., Dulmet M., Bonjour E. (2007). Cadre conceptuel pour un système de traçabilité en conception collaborative. In *10ème Colloque National des AIP-PRIMECA. Les Innovations en Conception des Produits et des Systèmes de Production.*
- Ben Youssef M. (2010). Modélisation conceptuelle pour les applications géomatiques temps réel. Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et l'Ecole Supérieure de Communications de Tunis.
- Benner J., Geiger A., Häfele K.H. (2010). Concept for building licensing based on standardized 3D Geo information. In *Proc. of the 5th International 3D GeoInfo Conference.*
- Billen R. (2000). Introduction of 3D information in urban GIS: a conceptual view.
- Billen R. (2002). Nouvelle perception de la spatialité des objets et de leurs relations. Développement d'une modélisation tridimensionnelle de l'information spatiale. Thèse de doctorat, Université de Liège.
- Billen R., Clementini E., 2004. Étude des caractéristiques projectives des objets spatiaux et de leurs relations. *Revue Internationale de Géomatique*, 14(2).
- Billen R., Pantazis D., Cornélis B. (2004). Application of ER and CONGOO formalisms in a spatial database-reengineering project. Department of Geography & Geomatics, University of Glasgow.
- Bishr M., Janowicz K. (2010). Can we trust information?-the case of volunteered geographic information. In *Towards Digital Earth Search Discover and Share Geospatial Data Workshop at Future Internet Symposium, volume (Vol. 640).*
- Bishr M., Mantelas L. (2008). A trust and reputation model for filtering and classifying knowledge about urban growth. *GeoJournal*, 72(3), 229-237.
- Bishr Y. (1998). Overcoming the Semantic and Other Barriers to GIS Interoperability. *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor & Francis, 1998, Vol. 12, pp. 299-314
- Blasby D., Davis M., Kim D., Ramsey P. (2003). GIS conflation using open source tools. White paper, The Jump Project.
- Bonham-Carter, G. F (1996) Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences*. Vol.13, Pergamon Publications. 398 p
- Boudet, L. (2007). Auto-qualification de données géographiques 3D par appariement multiimage et classification supervisée. Application au bâti en milieu urbain dense. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée.
- Brando C, Bucher B. (2010) Quality in User Generated Spatial Content: A Matter of Specifications. 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2010 Page 1 of 8 Guimarães, Portugal
- Breunig M., Zlatanova S. (2005). 3D Geo-DBMS. Large-scale 3D data integration- Challenges and Opportunities, 87-115.
- Brodeur J., Bédard Y., Proulx, M.J. (2000). Modelling geospatial application databases using UML-based repositories aligned with international standards in Geomatics. In *Proceedings of*

the 8th ACM international symposium on Advances in Geographic Information Systems (pp. 39-46). ACM.

- Brugman B. A. (2010). 3D topological structure management within a DBMS, validating a topological volume.
- Budhathoki N.M, Nedovic-Budic Z. (2010). How to motivate different players in VGI? GIScience, Zurich.
- Budhathoki N.M, Sieber R. (2011). What Motivates Governments to Adopt the Geospatial Web 2.0?
- Campagna M., Deplano G. (2002). Public participation GIS for re-development support in European historic city centres. Computergestützte Raumplanung CORP, Vienna, Department of computer aided planning and architecture, Vienna University of Technology.
- Campbell Heather J., Masser Ian. (1995). *GIS and Organizations "How effective are GIS in practice?"* Taylor and Francis Ltd. United Kingdom, 224 p.
- Caron C. (1991). Nouveau formalisme de modélisation conceptuelle adapté aux SIRS. Thèse Université Laval. 247p
- Chan, T. O., Feeney, M. E., Rajabifard, A., Williamson, I. (2001). The dynamic nature of spatial data infrastructures: a method of descriptive classification. *Geomatica*, 55(1), 65-73.
- Chanal V. (2000). Communautés de pratique et management par projet. *Management*, 3(1), 1-30.
- Chang Z.E., Li S. (2012). Geo-Social Model: A Conceptual Framework for Real-time Geocollaboration. *Transactions in GIS*.
- Chauvel A.M. (2001). Méthodes et outils pour résoudre un problème : 45 outils pour améliorer les performances de votre organisation. Paris: Dunod.
- Clementini E. (2009). A Conceptual framework for modelling spatial relations. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Clementini E., Di Felice P., Van Oosterom P. (1993). A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In *Advances in Spatial Databases* (pp.277-295). Springer Berlin/Heidelberg.
- Clementini E., Laurini R. 2008, un cadre conceptuel pour modéliser les relations spatiales. *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information (RNTI)*, 14, 1-17.
- Cleve A., Hainaut J.L. (2006). Co-transformations in database applications evolution. *Generative and Transformational Techniques in Software Engineering*, 409-421.
- Coleman D.J., Georgiadou Y., Labonte J. (2009) Volunteered Geographic Information: the nature and motivation of producers. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 4(1), 332-358.
- Collet C. (1992). Systèmes d'information géographique en mode image. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Consoli A., Tweedale J., Jain L. (2006). in IFIP International Federation for Information Processing, Volume 228, Intelligent Information Processing IE, eds. Z. Shi, Shimohara K., Feng D., (Boston: Springer), pp. 11-19.
- Coors V., 2003. 3D GIS in Networking environments, *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 27 (4), pp. 345–357

- Craglia M., Annoni A. (2007). INSPIRE: An innovative approach to the development of spatial data infrastructures in Europe. *Research and Theory in Advancing Spatial Data Infrastructure Concepts*, 93-105.
- Crampton, J. (2009) *Cartography: maps 2.0*. *Progress in Human Geography*, 33 (1): 91-100.
- Dameron S., Josserand E. (2007). Le développement d'une communauté de pratique Une analyse relationnelle, *Revue française de gestion*, 2007/5 n° 174, p. 131-148. DOI : 10.3166/rfg.174.131-148
- Darses F, Falzon P. (1996). La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. In G. de Terssac & E. Friedberg (Eds). *Coopération et Conception*. Toulouse : Octarès.
- Darses F. (2009). Résolution collective des problèmes de conception. *Le travail humain*, 2009/1 Vol. 72, p. 43-59. DOI : 10.3917/th.721.0043
- De Cambray, B. (1993). Three-dimensional (3D) modelling in a geographical database. In *Autocarto-Conference-* (pp.338-338). ASPRS
- De la Losa A., Cervelle B. (1999). 3D Topological modeling and visualisation for 3D GIS. *Computers & Graphics*, 23(4), 469-478.
- De La LOSA, (2000), Modélisation de la troisième dimension dans les BD géographiques. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.
- Dedekorkut A. (2003). Determinants of success in inter organizational collaboration for natural resource management. *Electronic Theses, Treatises and Dissertations*. Paper 793.
- Desgagné E. (2010) Conception et développement d'un SIG 3D dans une approche de service web. Exemple d'une application en modélisation géologique, Master Thesis. Université Laval
- Devogele T. (1997). Processus d'intégration et d'appariement de bases de données Géographiques, Applications à une base de données routières multi-échelles, Thèse de Doctorat, Université de Versailles.
- Devogele T., Parent C., Spaccapietra S. (1998). On spatial database integration. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4), 1998, p. 335-352.
- Doherty N., King M. (2004). The Treatment of Organisational Issues in Systems Development Projects: The Implications for the Evaluation of Information Technology Investments. *EJISE (Electronic Journal of Information Systems Evaluation)*, 4(1), [en ligne]. [<http://www.iteva.rug.nl/>]
- Douglas N., 2004. *Developing Spatial Data Infrastructures: The SDI cookbook*
- Doyle S., Dodge M., Smith A. (1998). The potential of web-based mapping and virtual reality technologies for modelling urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(2), 137-155.
- Drummond W.J., French S.P. (2008). The future of GIS in planning: converging technologies and diverging interests. *Journal of the American Planning Association*, 74(2), 161-174.
- Duboisset, M. (2007). Un système de contraintes d'intégrité OCL pour les bases de données spatiales. Application à un système d'information pour l'épandage agricole. Thèse. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2007.
- Duckham M., Lingham J., Mason K., Worboys M. (2006). Qualitative reasoning about consistency in geographic information. *Information Sciences*, 176(6), 601-627.

- Duckham M., Sharp J. (2005). Uncertainty and geographic information: computational and critical convergence. *Fisher P, Unwin D. Re-presenting GIS. West Sussex: John Wiley & Sons*, 113-124.
- Dunn C.E. (2007). Participatory GIS-a people's GIS? *Progress in Human Geography*, 31(5), 616-637.
- Egenhofer M. (1989). A formal definition of binary topological relationships. *Foundations of data organization and algorithms*, 457-472.
- Egenhofer M.J., Herring J. (1990). Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases. *The*, 94-1.
- Ekberg F. (2007). An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties (Thèse Master en Géomatique, Université de Gävle).
- Ellis C.A., Gibbs S.J., Rein G. (1991). Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1), 39-58.
- Ellul C., Haklay, M.M. (2009). Using a B-rep structure to query 9-intersection topological relationships in 3D GIS—reviewing the approach and improving performance. *3D Geo-information Sciences*, 127-151.
- El-Mekawy M. Östman A., Hijazi I. (2012). A Unified Building Model for 3D Urban GIS ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2012, 1, 120-145; doi:10.3390/ijgi1020120
- El-Mekawy M., Östman A. (2010). Semantic Mapping: an Ontology Engineering Method for Integrating Building Models in IFC and CITYGML. *Proceedings of the 3rd ISDE Digital Earth Summit*, 12-14.
- El-Mekawy M., Östman A., Shahzad K. (2011). Towards Interoperating CityGML and IFC Building Models: A Unified Model Based Approach. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, 73-93.
- Elwood S. (2006). Critical issues in participatory GIS: deconstructions, reconstructions, and new research directions. *Transactions in GIS*, 10(5), 693-708.
- Euzenat, J. et Shvaiko, P. (2007). *Ontology matching*. Springer, 2007, p.333
- Faber B., Wallace W., Cuthbertson J. (1995). *Advances in collaborative GIS for land resource negotiation*. GIS95, GIS modelling and analysis in resource environments, Vancouver, British Columbia, Canada, GIS World, Inc.
- Falquet G., Métral C. (2005). Integrating urban knowledge into 3D City Models. In *Proc. First International Workshop on Next Generation 3D City Models, Bonn, Germany*.
- Flanagan A.J., Metzger M.J. (2008). The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal*, 72(3), 137-148.
- Fonseca F.T., Egenhofer M.J., Agouris P., Câmara G. (2002). Using ontologies for integrated geographic information systems. *Transactions in GIS*, 6(3), 231-257.
- Fontaine M.A., Millen, D.R. (2004). Understanding the benefits and impact of communities of practice. *Knowledge networks: Innovation through communities of practice*, 1-13.
- Friis-Christensen A., Tryfona N., Jensen C.S. (2001). Requirements and research issues in geographic data modeling. *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Advances in Geographic Information Systems*. ACM.
- Fuchs C., Gülch E. Förstner W. (1998). OEEPE survey on 3D-city models. OEEPE, official publication n° 35 (cité par Billen, 2000)

- Geertman S. (2002). Participatory planning and GIS: a PSS to bridge the gap. *Environment and Planning B*, 29(1), 21-36.géographiques linéaires. Thèse de Doctorat, Université Marne-la-Vallée.
- Gesbert N. (2005). Formalisation des spécifications de bases de données géographiques en vue de leur intégration. Thèse de Doctorat, Université de Marne-la-Vallée.
- Girardot J. (2004). Intelligence territoriale et participation. In 3° Rencontres TIC & Territoires quels développements?
- Goetz M., Zipf A. (2012a). Towards defining a framework for the automatic derivation of 3D CityGML models from volunteered geographic information. *International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)*, 1(2), 1-16.
- Goetz M., Zipf A. (2012b). OpenStreetMap in 3D–Detailed Insights on the Current Situation in Germany. In *15th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Avignon, France* (Vol. 26, No. 04, p. 2012).
- Gomboši M., Žalik B., Krivograd S. (2003). Comparing two sets of polygons. *International Journal Of Geographical Information Science*, 17(5), 431.
- Goodchild M. F. (2007). "Citizens as voluntary sensors: Spatial data infrastructure in the World of Web 2.0." *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research* 2: 24-32.
- Goodchild M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, (1), 3-20.
- Gray B. (1989). *Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems* (San Francisco: Jossey-Bass, 1989), p.11
- Gröger G., Kolbe T.H., Czerwinski A. (2007). City Geography Markup Language (CityGML). *OGC Best Practices Document, Version 0.4. 0, OGC Doc, (07-062)*.
- Gröger G., Kolbe T.H., Czerwinski A., Nagel C. (2008). OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0, OGC Doc. No. 08-007r1, Open Geospatial Consortium
- Gröger G., Plümer L. (2012). CityGML–Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33.
- Gross M., Do E. (2007). Tools and Principles for Collaborative Design. In *Workshop on Tools in Support of Creative Collaboration* (pp. 13-15).
- Gruber T.R. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International journal of human computer studies*, 43(5), 907-928.
- Hadzilacos T., Tryfona N. (1997). An extended entity-relationship model for geographic applications. *ACM SIGMOD Record*, 26(3), 24-29.
- Hajji R. et Billen R. (2012). Vers une méthode de conception de SIG 3D collaboratif. SAGEO 2012
- Haklay M., Singleton A., Parker C. (2008). Web mapping 2.0: The neogeography of the GeoWeb. *Geography Compass*, 2(6), 2011-2039.
- Hallot P., (2012). Rapport PICC.
- Hansen H.S, L.S., Line Hvingel, Jesper Skovdal Christiansen (2011). Towards Spatially Enabled e-Governance-A Case Study on SDI implementation. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research* Vol.6.

- Hashemi Beni L., Mostafavi M.A, Pouliot J. (2007). 3D Dynamic Simulation within GIS in Support of Disaster Management. *Geomatics Solutions for Disaster Management*: 165-184.
- Hay G.J., Castilla G. (2006). Object-based image analysis: strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT). In *Proc. 1st Int. Conf. OBIA*.
- Hijazi, I., Ehlers, M., Zlatanova, S., Isikdag, U. (2009). IFC to CityGML transformation framework for geo-analysis: a water utility network case. In *3D GeoInfo, Proceedings of the 4th International Workshop on 3D Geo-Information, Ghent: Ghent University* (pp. 123-127).
- Hirst G., St Onge D. (1998). Lexical chains as representations of context for the detection and correction of malapropisms. In: Fellbaum, C. (éd.), *WordNet: An electronic lexical database*. Cambridge (Etats-Unis): The MIT Press, 1998
- Houlding S.W (1994). 3D geoscience modelling: computer techniques for geological characterization. Springer-Verlag, Berlin, 309 p
- Huang B. (2003). Web-based dynamic and interactive environmental visualization. *Computers, environment and urban systems*, 27(6), 623-636.
- Huang B., Jiang B., Li H. (2001). An integration of GIS, virtual reality and the Internet for visualization, analysis and exploration of spatial data. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(5), 439-456.
- Hwang D., Karimi H. A., Byun D. W. (1998). Uncertainty analysis of environmental models within GIS environments. *Computers & Geosciences*, 24(2), 119-130.
- IAI. (2008). The Institute for Applied Computer Science. Accès en ligne: <http://www.iai.fzk.de/www-extern/index.php?id=796&L=1> (accès le 05/02/2013)
- Ibraheem A. T., Hassan H. A., Al-Husain M. H. A. (2012). Integrating ACAD with GIS for Civil Engineering Applications. *Journal of Software Engineering and Applications*, 5(3), 138-146.
- Isikdag U., Zlatanova S. (2009). A SWOT analysis on the implementation of Building Information Models within the Geospatial Environment. *Urban and Regional data Management, UDMS Annuals*, 15-30.
- ISO. (2004). ISO/IEC 14772–1:1997 and ISO/IEC 14772–2:2004-Virtual Reality Modeling Language (VRML).
- ISO. (2008). ISO/IEC FCD 19775–1r1:200x Information technology-Computer graphics, image processing and environmental representation-Extensible 3D (X3D). Part1: Architecture and base components
- Jankowski P., Balram S., Dragicevic S., Feick R. (2009). Towards participatory geographic information systems for community-based environmental decision making. *Journal of Environmental Management*, 90(6), 1966-1971.
- Jankowski P., Nyerges T. (2001). GIS-Supported Collaborative Decision Making: Results of an Experiment, *Annals of the Association of American Geographers*, 91:1, 48-70
- Jiang B., Huang B., Vasek, V. (2003). Geovisualisation for planning support systems. *Planning Support Systems in Practice*, 177-191.
- Joliveau T. (2004). Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG. Université de Rouen, Département de Géographie, mémoire HDR
- Joliveau T. (2008). Web 2.0 futur du Webmapping avenir de la géomatique? *Géoévénement*, Paris, Avril 2008.

- Jones CB (1989). Data structures for three-dimensional spatial information systems in geology, *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol.3, No.1, Taylor & Francis, London. pp. 15-31
- Kacem M.H. (2008). Modélisation des applications distribuées à architecture dynamique: Conception et Validation. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- Karimi H. A., Akinci B. (2010). *CAD and GIS Integration*, Taylor & Francis.2010
- Keita A.K. (2007). Conception coopérative d'ontologies pré-consensuelles: Application au domaine de l'urbanisme. Thèse de l'INSA de Lyon
- Khairuddin N.N, Hashim K. (2008). Requirements visualization techniques: A comparative analysis. *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Applied Computer Science*.
- Khuan C.T., Rahman A.A., Zlatanova S. (2007). New 3D data type and topological operations for Geo-DBMS. *Urban and Regional Data Management: UDMS Annual*.
- Kingston R., Carver S., Evans A., Turton I. (1999). A GIS for the public: enhancing participation in local decision making. *GIS Research UK (GISRUK'99)*. Available online at <http://www.geog.leeds.ac.uk/papers/99,7>.
- KIT (2011). Karlsruhe Institute of Technology, Semantic Data Models. Disponible en ligne (<http://www.iai.fzk.de/www-extern/index.php?id=796>) (accès le 05-02-2013).
- Knapp S., Bogdahn J., Coors V. (2007). Improve public participation in planning processes by using web-based 3D-models for communication platforms. Vienna: corp.
- Kolbe T.H. (2009). Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. Presented as keynote talk at the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, 13-14 November in Seoul, South Korea.
- Koussa C., (2011). Implantation d'un SIG 3D sur Internet pour la gestion des modèles urbains. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Kubicek H., Cimander R., Scholl H.J. (2011). Layers of Interoperability. In *Organizational Interoperability in E-Government* (pp. 85-96). Springer Berlin Heidelberg.
- Lachance, B. (2005). Développement d'une structure topologique de données 3D pour l'analyse de modèles géologiques. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Canada.
- Lafarge, F. (2007). Modèles stochastiques pour la reconstruction tridimensionnelle d'environnements urbains. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Laferté, J. M., Daussin, G., et Flifla, J., (2009). Modélisation de linéaires par des NURBS pour un simulateur de vols
- Larrivée S., Bédard Y., Pouliot J., (2002). Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D. En ligne. (<http://yvanbedard.scg.ulaval.ca/wp-content/documents/publications/412.pdf>)
- Larrivée, S., Bédard, Y., et Pouliot, J. (2005). How to enrich the semantics of geospatial databases by properly expressing 3D objects in a conceptual model. In *On the Move to Meaningful Internet Systems 2005: OTM 2005 Workshops* (pp. 999-1008). Springer Berlin/Heidelberg.
- Lbath A., Pinet F. (2000). The development and customization of GIS-based applications and web-based GIS applications with the case tool Aigle. In *Proc. 8th ACM GIS*.

- Lee J., Zlatanova S. (2008). A 3D data model and topological analyses for emergency response in urban areas. *Geospatial information technology for emergency response*, 6, 143.
- Lemarié C. (1996). Etat de l'art sur l'appariement, rapport technique IGN, num. DT/9600022
- Lemarié C. et Raynal L. (1996). Geographic Data Matching: First investigations for a generic tool. In *Proc. of GISLIS'96*; pp.405-420.
- Lisboa-Filho J., Sampaio G.B., Nalon F. R., Borges K. A. D. V. (2010). A UML profile for conceptual modeling in GIS domain. In *Proceedings of the International Workshop on Domain Engineering*, Tunisia (pp.18-31).
- Livre Blanc. (2004). Les communautés de pratique. Analyse d'une nouvelle forme d'organisation & panorama des bonnes pratiques. Réalisé en partenariat par Knowings et le Pole Productique de Rhône Alpes.
- London S. (1995). Collaboration and community. Retrieved November 19: 2002.
- Longley P., Goodchild M.F., Maguire D., Rhind D. (2005). *Geographic information systems and science*. Wiley. (ouvrage cité par Carmen Brando)
- Luscombe B.W., Poiker T.K. (1983). Strabo: An Alternative GIS Approach to Decision-Making for Planning Applications in Data Scarce Environments. In *Proceedings of Auto Carto* (Vol. 6, pp. 264-270).
- MacEachren A.M., Brewer I. (2004). Developing a conceptual framework for visually-Enabled Geocollaboration. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(1), 1-34.
- Madhavan J., Bernstein P.A., Rahm E. (2001). Generic schema matching with cupid. In *Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases* (pp. 49-58).
- Maguire D. J., Longley P.A. (2005). The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(1), 3-14.
- Masson M.H. (2005). Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises (Mémoire de HDR, Université de Technologie de Compiègne).
- Mayer I.S., Van Bueren E., Bots P., van der Voort H., Seijdel R. (2005). Collaborative decision making for sustainable urban renewal projects: a simulation-gaming approach. *Environment and Planning B: planning and design*, 32(3), 403-423.
- McDougall K., Rajabifard A., Williamson I. (2005a). What will motivate local governments to share spatial information? In *Proceedings of the 2005 Spatial Sciences Institute Biennial Conference: Spatial Intelligence, Innovation and Praxis (SSC2005)* (pp. 379-388). Spatial Sciences Institute.
- McDougall K., Rajabifard A., Williamson I. (2005b). Understanding the motivations and capacity for SDI development from the local level. In *Proceedings of the 8th International Conference on Global Spatial Data Infrastructure: From Pharaohs to Geoinformatics (GDSI 8)*. International Federation of Surveyors (FIG).
- Mericskay B. et Roche S. (2010). Cartographie et SIG à l'ère du Web 2.0: Vers une nouvelle génération de SIG participatifs. Actes du colloque. SAGEO 2010.
- Metral C., Billen R., Cutting-Decelle A.F., Van Ruymbeke M. (2010). Ontology-based approaches for improving the interoperability between 3D urban models. *Journal of Information Technology in Construction*, 15.
- Miralles A. (2006). Ingénierie des modèles pour les applications environnementales. Thèse Université de Montpellier II, 2006, 344p

- Mostafavi M.A. (2006). Semantic similarity assessment in support of spatial data integration. In *7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Edited by M. Caetano and M. Painho. Lisbonne, Portugal.
- Mustière S. (2006). Results of experiments on automated matching of networks at different scales. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 92-100.
- Mustière S., Abadie N., Laurens F. (2007). Appariement de schémas de BD géographiques à l'aide d'ontologies déduites des spécifications. In : Actes de la Conférence EGC, Namur, janvier 2007, p. 22-27
- Mustière S., Devogele T. (2008). Matching networks with different levels of detail. *Geoinformatica*, 12(4), 435-453.
- Nagel C., Stadler A., Kolbe T.H. (2009). Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3D models. In *Academic Track of Geoweb 2009 Conference, Vancouver*.
- Neis P., Zielstra D., Zipf, A. (2011). The street network evolution of crowdsourced maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011. *Future Internet*, 4(1), 1-21.
- Neteler M., Bowman M.H., Landa M., Metz M. (2012). GRASS GIS: a multi-purpose Open Source GIS. *Environmental Modelling & Software*.
- Nguyen gia, T.A. (2011). Propose New Structure for the Buildings Model. *Ubiquitous Computing and Multimedia Applications*, 23-32.
- Noucher M. (2006). Mutualisation de l'information géographique : Communautés De Pratique ou Infrastructures de Données Spatiales? Geo-Evenement 2006
- Noucher M. (2007), Coproduction de données géographiques: pourquoi, comment et avec qui?, SAGEO-CQFD, Clermont-Ferrand, 2007
- Noucher M. (2009a). La donnée géographique aux frontières des organisations: approche socio-cognitive et systémique de son appropriation. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Noucher M. (2009b). Quels leviers d'action pour rendre nos SIG plus collaboratifs? Bulletin e-geo.ch.
- Noucher M. (2012). La donnée géographique aux frontières des organisations: des réseaux géomatiques à l'intelligence territoriale. *Revue Internationale de Géomatique*, 22(1/2012), 7-30.
- Noucher M., C. Archias. (2007). L'évaluation des Infrastructures de Données Spatiales- Application de divers cadres d'évaluation au CRIGE PACA. *Conference Geo-Evenement*. 2007.
- Noucher M., Marceau M.H., Golay F., Pornon H. (2006). Les Technologies de l'Information Géographique: Aubaine ou obstacle pour produire ensemble des données sur le territoire? In Conférence OPDE 2006 (Les Outils pour Décider Ensemble).
- OGC, (2004). Implementation Specification: OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Version: 3.1.1. Reference number of this OpenGIS® project document: OGC 03-105r1.
- Olteanu A.M. (2008). Fusion de connaissances imparfaites pour l'appariement de données géographiques: proposition d'une approche s'appuyant sur la théorie des fonctions de croyance. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.

- Oosterom P.V, Stoter J., Jansen E., 2006. Bridging the worlds of CAD and GIS. In: Zlatanova and Prospero (Eds.) Large-scale 3D Data Integration: Challenges and Opportunities, CRCpress, pp. 9-36.
- Oracle (2011). Site officiel d'Oracle (<http://www.oracle.com>)
- Urban-Ferauge F. (2011), Systèmes d'information géographique participatifs et aménagement du territoire, Expériences philippines citoyennes de désenclavement, Presses Universitaires de Namur.
- OSM-3D. (2013). OSM-3D in XNavigator. <http://www.osm-3d.org>. Extrait le 04/03/2013.
- Pantazis D., Donnay JP. (1996). La conception de SIG, méthode et formalisme, Paris, Editions Hermès, 1996
- Parent C., Spaccapietra S. (1996). *Intégration de bases de données : panorama des problèmes et des approches. Ingénierie des systèmes d'information*, 1996, vol. 4, n° 3, p. 333-358
- Parent C., Spaccapietra S., Zimanyi E., Donini P., Plazanet C., Vangenot C, Rognon N., Rausaz P. (1997). MADS, modèle conceptuel spatio-temporel. *Revue Internationale de Géomatique*, 1997, Vol. 7, n°3-4, pp. 317-351
- Patwardham S. (2003). Incorporating Dictionary and Corpus Information in a Measure of Semantic Relatedness. Thèse de Doctorat, Université du Minnesota, Etats-Unis, 2003
- Pilouk M. (1996). Integrated Modelling for 3D GIS. PhD Thesis, ITC Publication Series. The Netherlands
- Pinet F., Lbath A., Vigier F., Schneider M. (2003). Conception de Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) communicants pour les agrosystèmes. *Ingénieries*. N° spécial 2003. P 143-155.
- Pinto, J. K., Onsrud, H. J. (1997). In search of the dependent variable: Toward synthesis in GIS implementation research. *Geographic information research: Bridging the Atlantic*, 129-145.
- Pirotti F., Guarnieri A., Vettore A. (2011). Collaborative Web-GIS Design: A Case Study for Road Risk Analysis and Monitoring. *Transactions in GIS*, 15(2), 213-226.
- Pornon H. (1998). Partenariats relatifs aux SIG: proposition d'une typologie et d'une grille d'évaluation.
- Pornon H. (2007). Bilan et perspectives de 20 années de Géomatique Vers des SIG plus collaboratifs- La Géocollaboration. *Géomatique Expert - N° 58 - Août-Septembre 2007*
- Pornon H., Noucher M. (2007). Bilan et perspectives de 20 années de Géomatique - Vers des SIG plus collaboratifs. Les Communautés de pratique. *Géomatique Expert - N° 59 - Octobre-Novembre 2007*
- Pouliot J., Bédard K., Kirkwood D., Lachance B. (2008). Reasoning about geological space: Coupling 3D GeoModels and topological queries as an aid to spatial data selection. *Computers & Geosciences*, 34(5), 529-541.
- Pouliot, J., Lachance, B. et Kirkwood, D. (2006) L'importance de la modélisation géométrique pour les SIG-3D: Exemple du développement d'un modèle topologique 3D pour une application géologique, *Revue Internationale de Géomatique*, v. 16/1.
- Rageul N., (2007). Vers une optimisation du processus d'analyse en ligne de données 3D: cas des fouilles archéologiques, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Canada.

- Rahm E., Bernstein P.A. (2001). On matching schemas automatically. *VLDB Journal*, 10(4), 334-350
- Rahman A.A, Pilouk M., (2008). *Spatial Data Modeling for 3D GIS*. ISBN 978-3-540-74166-4 Springer Berlin Heidelberg New York
- Rahman A.A., Zlatanova S., Pilouk M. (2001). The 3D GIS Software Development: global efforts from researchers and vendors. *Geoinformation Science Journal*, 1(13).
- Rajabifard A., Feeney M. E. F., Williamson I. P. (2002). Future directions for SDI development. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), 11-22.
- Rambaldi G., Callosa-Tarr J. (2002). Participatory 3-Dimensional Modelling: guiding principles and applications.
- Ramos F., (2003). Modélisation et validation d'un Système d'information Géographique 3D opérationnel. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.
- Raper J, Kelk B. (1991) Three-dimensional GIS, In: *Geographical information systems: principles and applications*. D J Maguire, M Goodchild and DW. Rhind (eds.) Longman Geoinformation, pp. 299-317
- Ressler J., Freese E., Boaten V.(2009). Semantic Method of Conflation
- Rieder. (2008) Entre marché et communauté: une discussion de la culture participative à l'exemple de Google Maps. Actes de la conférence Ludovia, 2008
- Roche S. (2009). Géoweb et travail collaboratif: quelques éléments de cadrage Bulletin e-geo.ch
- Roche S., Humeau J.B. (1999). GIS development and planning collaboration: A few examples from France. *URISA-WASHINGTON DC-*, 11, 5-14.
- Rodriguez-Pabon, O. (2005). Cadre théorique pour l'évaluation des infrastructures d'information géospatiale. Université Laval, faculté de foresterie et de géomatique.
- Rogers D.L., Whetten D.A. (1982). *Inter organizational coordination: Theory, research, and implementation*. Ames, IA: Iowa State University Press.
- Rongxing Li (1994). Data structures and application issues in 3-D geographic information systems. *Geomatica*. Vol.48, No.3, pp. 209-224
- Rousson C., Roche S. (2007). Vers l'élaboration d'une infrastructure géomatique collaborative- la gestion forestière comme modèle d'étude, *SAGEO*, 2007
- Ruiz J. J., Ariza F., Ureña, M. A., Blázquez, E. B. (2011). Digital map conflation: a review of the process and a proposal for classification. *International Journal Of Geographical Information Science*, 25(9), 1439-1466. doi:10.1080/13658816.2010.519707
- Ryttersgaard J.(2001).Spatial Data Infrastructure-Developing Trends and Challenges. In *Proceedings of International Conference on Spatial Information for Sustainable Development* (pp. 2-5).
- Sacre R. (2001). *Manager efficacement un groupe projet en conception*. Paris: AFNOR.
- Safra, E., Kanza, Y., Sagiv, Y. et Doytsher, Y. (2006). Efficient Integration of Road Maps. In *Proceedings of the 14th annual ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, Arlington (Etats-Unis), 10-11 novembre 2006. ACM Press, p. 59-66

- Saleh Y., Alshawi M. (2005). An alternative model for measuring the success of IS projects: the GPIS model. *Journal of Enterprise Information Management*, 18(1), p. 47-63.
- Sargent I., Harding J., Freeman M. (2007). Data quality in 3D: gauging quality measures from users' requirements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(2/C43), 8.
- Schafer W.A., Ganoe C.H., Carroll J.M. (2007). Supporting community emergency management planning through a geocollaboration software architecture. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 16(4), 501-537.
- Schermerhorn J.R.(1975).Determinants of Interorganizational Cooperation. *Academy of management Journal*, 18(4), 846-856.
- Schön B., Mohammad Mosa A.S., Laefer D. F., Bertolotto M. (2012). Octree-based Indexing for 3D Pointclouds within an Oracle Spatial DBMS. *Computers & Geosciences*. 51 (2013) 430–438
- Serafeimidis V., Smithson S. (2003). Information systems evaluation as an organizational institution—experience from a case study. *Information Systems Journal*, 13(3), 251-274.
- Sheeren D., Mustière S., Zucker J.D. (2009). A data-mining approach for assessing consistency between multiple representations in spatial databases. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8), 961-992.
- Sheeren D., Mustière S., Zucker J-D. (2004). How to Integrate Heterogeneous Spatial Databases in a Consistent Way? *Conference on Advanced Databases and Information Systems*, Budapest, September 2004, p. 364-378.
- Sheeren, D. (2002). L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multirésolutions. *Revue internationale de géomatique*, 12(2), 151-168.
- Shi W., Yang B., Li Q. (2003). An object-oriented data model for complex objects in three-dimensional geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(5), 411-430.
- Simonsen J. (1994). *Soft Systems Methodology: An Introduction*. Roskilde University.
- Siret D., Musy M., Ramos F., Groleau D., Joanne P. (2006). Développement et mise en œuvre d'un SIG 3D environnemental urbain. *Revue Internationale de Géomatique*, 16(1), 71-91.
- Spaccapietra S., Parent C., Dupont Y. (1992). Model independent assertions for integration of heterogeneous schemas. *The VLDB Journal - The International Journal on Very Large Data Bases*, 1(1), 81-126.
- St-Aubin B. (2011). Vers le développement d'un système interactif et collaboratif de réalité augmentée géospatiale pour des applications en design urbain. Thèse de doctorat. Université Laval.
- Steiniger S., Hunter A. J. (2012). Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure. *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, 247-261.
- Stoter J.E (2004). 3D Cadastre. Publications on Geodesy 57. NCG, Netherlands Geodetic Commission, Delft, the Netherlands, 342 p.
- Stoter J.E., Van Oosterom P. (2006). 3D Cadastre in an International Context: legal, organizational, and technological aspects. CRC.
- Stoter, J., van den Brink, L., Vosselman, G., Goos, J., Zlatanova, S., Verbree, E., ... & Thorn, S. (2011). A generic approach for 3D SDI in the Netherlands. In *Proceedings of the Joint*

ISPRS Workshop on 3D City Modelling & Applications and the 6th 3D GeoInfo Conference (pp. 26-28).

- Turner A. (2006). *Introduction to Neogeography*. Sebastopol, CA, O'Reilly.
- Van Oosterom P., Stoter, J. (2010). 5D data modeling: full integration of 2D/3D space, time and scale dimensions. *Geographic Information Science*, 310-324.
- Vauglin, F. (1997). *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets*
- Viglino J.M. (2011). Vers un système collaboratif pour la mise à jour de référentiels géographiques. *Proceedings of the 25th international Cartographic Conference (ICC, 2011)*. Paris, France
- Volz S. (2005). Data-driven matching of geospatial schemas. In *Spatial information theory* (pp. 115-132). Springer Berlin Heidelberg.
- Voss A., Denisovich I., Gatalsky P., Gavouchidis K., Klotz A., Roeder, S., Voss, H. (2004). Evolution of a participatory GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(6), 635-651.
- Warnest M. (2005). A collaboration model for national spatial data infrastructure in federated countries. University of Melbourne, Department of Geomatics
- Watson R.T., Pitt L.F., Kavan C.B. (1998). Measuring information systems service quality: lessons from two longitudinal case studies. *MIS quarterly*, 61-79.
- Wenger E. (1998). *Communities of Practices: learning, meaning and identity*, Cambridge University Press, 1998.
- Willcocks L. (1992). Evaluating Information Technology Investments: Research Findings and Reappraisal. *Journal of Information Systems*, 2(3), p. 243-268.
- Wilson T. (2008). Open Geospatial Consortium KML (Keyhole Markup Language), Version: 2.2.0. Open Geospatial Consortium, doc. no. 07-147r2
- Worboys M. F. (1995). *GIS: A computing perspective*, Taylor & Francis, London.
- Wu A., Zhang X., Convertino G., Carroll J.M. (2009). CIVIL: support geo-collaboration with information visualization. In *Proceedings of the ACM 2009 international conference on Supporting group work* (pp. 273-276). ACM.
- Wu H., He Z., Gong J. (2010). A virtual globe-based 3D visualization and interactive framework for public participation in urban planning processes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(4), 291-298.
- Wu Z., Palmer M. (1994). Verbs semantics and lexical selection. In *Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics* (pp.133-138). Association for Computational Linguistics.
- Yao J., Tawfik H., Fernando T. (2006). A GIS based virtual urban simulation environment. *Computational Science-ICCS 2006*, 60-68.
- Yuan S., Tao C. (1999). Development of conflation components. *Proceedings of Geoinformatics*, 99, 1-13.
- Zhang, X., Q. Zhu (2008). Applications of 3D City Models based spatial analysis to urban design.

- Zhu Q., Gong J., Zhang Y. (2007). An efficient 3D R-tree spatial index method for virtual geographic environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(3), 217-224.
- Zielstra D., Zipf A. (2010). A comparative study of proprietary geodata and volunteered geographic information for Germany. In *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science* (Vol. 2010).
- Zlatanova S. (2000a). On 3D topological relationships. In *Database and Expert Systems Applications, 2000. Proceedings. 11th International Workshop on* (pp. 913-919). IEEE.
- Zlatanova S. (2000b). 3D GIS for urban development. International Inst.for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Zlatanova S., Rahman A.A, Shi W. (2004). Topological models and frameworks for 3D spatial objects. *Computers & Geosciences* 30(4): 419-428.