



HAL
open science

**Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie
concourante pour la mise en oeuvre des projets
d'infrastructures linéaires urbaines : prise en compte des
interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets**

Charles-Edouard Tolmer

► **To cite this version:**

Charles-Edouard Tolmer. Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en oeuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2016. Français. NNT : 2016PESC1190 . tel-01547312

HAL Id: tel-01547312

<https://theses.hal.science/tel-01547312>

Submitted on 26 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la
mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines :
Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets.

Thèse dirigée par Youssef DIAB

**Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est
Spécialité Génie Urbain**

**Présentée et soutenue publiquement par
Charles-Edouard TOLMER
Le 7 novembre 2016**

Jury :

AMIN HAMMAD	Professeur/ Université de Concordia	Rapporteur
JACQUES TELLER	Professeur/Université de Liège	Rapporteur
BERNARD FERRIES	Maître-assistant/ENSA de Toulouse	Examineur
ANNE RUAS	Directrice de recherche / IFSTTAR	Examineur
CHRISTOPHE CASTAING	Directeur de projet/Egis	Co-encadrant
YOUSSEF DIAB	Professeur/Université Paris Est-Marne la Vallée	Directeur de thèse
DENIS MORAND	Maître de Conférences/Université Paris Est-Marne la Vallée	Co-encadrant

Résumé

Le BIM, pour Building Information Modeling, est actuellement en pleine explosion. Il s'appuie sur la progression des outils informatiques. Toutefois, la gestion de l'information au sein d'un projet d'infrastructure (route, rail, aéroport ou autres ouvrages de génie civil) nécessite également l'utilisation de méthodologies et de concepts spécifiques comme les notions de « niveau de détail », de « niveau de développement » ou de « niveau d'abstraction ». Ils servent à décrire l'information pertinente à échanger entre acteurs, selon des objectifs de modélisation, en vue de répondre aux exigences du projet. Dans le contexte spécifique des projets d'infrastructures, ces outils sont mal définis, insuffisants et amènent parfois à des modélisations contradictoires.

Dans une optique de progression vers une conception en ingénierie concurrente, notre travail de recherche apporte une contribution en deux parties. En se basant sur les principes de l'ingénierie système, la première partie consiste à proposer une méthodologie d'identification des exigences à satisfaire et de l'information pertinente pour y répondre et contrôler cette réponse. La seconde partie décrit le modèle conceptuel de données du projet : il traite de la structuration des objets qui le modélisent en lien avec l'identification des exigences. Cette proposition s'accompagne d'une redéfinition de plusieurs types de niveaux existants (de détail, de développement, d'information, d'abstraction, etc.). Ces apports sont éprouvés sur un projet d'autoroute en milieu urbain dans un contexte industriel.

Les échanges d'informations sont au cœur du BIM. La précision ainsi que la qualité des informations échangées participent à la réussite tant technique que managériale du projet. Notre proposition méthodologique permet de faire évoluer les pratiques et le regard que le secteur de la construction porte sur l'information qu'il crée. Elle participe également à la numérisation du secteur de la construction.

Mots-clés : projet d'infrastructure, LOD, modèle conceptuel de données, BIM use, gestion des exigences, ingénierie système.

Abstract

Building Information Modelling (BIM) is currently booming. It is based on the progress of IT tools. However, the information management within an infrastructure project (road, rail, airport and other civil engineering works) also requires the use of specific methodologies and concepts like the concepts of "level of detail", "level of development" or "level of abstraction". They are used to describe the relevant information that have to be exchanged between stakeholders, according to the modeling objectives in order to meet the project requirements. In the specific context of infrastructure projects, these tools are poorly defined, insufficient and sometimes bring to contradictory models.

With a view to progress towards concurrent engineering design, our research is a contribution in two parts. Based on the principles of systems engineering, the first part is about to provide a methodology for requirements and relevant information identification to respond and control this response. The second part describes the project conceptual data model : it deals with the structure of the objects that model in connection with the requirements identification. This proposal is accompanied by a redefinition of several types of existing levels (detail, development, information, abstraction, etc.). These inputs are tested on a project of urban freeway in an industrial context.

The exchange of information is at the center of BIM. The accuracy and quality of exchanged information participate in both technical and managerial project success. Our proposed methodology allows to change practices and the vision that the construction sector looks forward to the information it creates. It also participates in the digitalization of the construction sector.

Keywords : Infrastructure project, LOD, conceptual data model, BIM use, requirements management, system engineering.

Connaître c'est construire des représentations vraies des choses rencontrées dans l'expérience.

KANT.

Cette citation prendra tout son sens après la lecture de ce mémoire de thèse. Encore faudrait-il pouvoir définir cette *vérité*, qui reste somme toute relative à chacun de nous, comme le rappelle Aurélien [Barrau](#) en présentant son ouvrage *De la vérité dans les sciences*.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon encadrement universitaire et industriel de m'avoir accompagné et orienté durant tout mon travail de recherche. Merci tout particulièrement à Youssef Diab et Christophe Castaing sans qui cette thèse n'aurait pas été ce qu'elle est !

Je remercie également les membres de mon jury pour leur intérêt et le temps consacré à mes travaux et pour la pertinence de leurs critiques et interrogations : Amin HAMMAD, Jacques TELLER, Anne RUAS, Bernard FERRIES et Denis MORAND.

Je souhaite également remercier mes collègues d'Egis. Ceux qui m'ont fait confiance et qui m'ont donné les moyens et la liberté nécessaires à un travail de thèse. Et ceux qui m'ont accompagné, aidé, appris sans retenue et encouragé jusqu'à la fin (et même encore aujourd'hui, car oui, même en trois ans je n'ai pas tout appris¹). Merci tout particulièrement à Nicolas Rageul qui m'a apporté un socle de connaissances suffisant pour me lancer dans mon travail.

Je souhaite également remercier mes collègues du Lab'Urba GU ! Toujours disponibles et ce, jusqu'au bout (même au pot). Cela a toujours été un plaisir de vous voir chaque semaine. Merci surtout à mes deux Mary pour leur soutien, leurs conseils et leurs blagues, aussi. Merci aux autres docs retardataires avec qui c'était sympathique de travailler. La fine équipe des doctorants de Marne.

Régine et Marie-Claire, également un grand merci à toutes les deux : vous m'avez bien fait grandir tant du point de vue académique et théorique, approche que j'aime tant, que du point de vue opérationnel.

Merci au Gymnases des Droits de l'homme pour ses mercredi midi volant et filet. Un esprit sain dans un corps de courbatures disait le dicton, semble-t-il.

Merci à Jacques André, que je ne connais pas personnellement mais qui, par son ouvrage [André, 2013, Petites leçons de typographie], à contribué à la qualité et à l'homogénéité typographique de ce mémoire. Et donc merci à Marie Toubin qui me l'a conseillé. Elle a également grandement participé à la réussite de cette Cifre par ses conseils et sa personnalité.

De nombreux mercis à tous ceux qui ont influencé mon travail de recherche, mes choix, sans forcément le savoir. Je pense même au RER, pour m'avoir bercé toutes ces heures et pour m'avoir permis de lire ou de me plonger dans de nombreuses pensées constructives pour mon travail, mais sans jamais quitter la réalité et sans jamais sombrer dans les démons de GÖDEL...

Merci à mes parents, qui m'ont toujours soutenu, non sans quelques inquiétudes naturelles, et à ma famille sans qui je n'aurais jamais pu faire tout ce chemin. Merci également aux amis d'avoir été compréhensif pendant ces dernières années.

Enfin, merci à mon petit bonheur qui a attendu tard le soir que je rentre, par de froides soirées d'hiver. Elle qui m'a soutenu et surtout fait sourire suffisamment pour aller jusqu'au bout !

Et merci à tous les autres que j'aurais pu oublier. Je devais m'arrêter là vous voyez bien que c'est la fin de la page.

1. D'ailleurs, de nombreux collègues semblaient encore plus heureux que moi que je continue de travailler avec eux après ce travail de thèse, ce que je peux comprendre me connaissant moi même.

Table des matières

Table des matières	v
Introduction Générale	1
Contexte de la recherche	1
Objectifs et questionnements de recherche	3
Structure du mémoire	5
Première partie : Appréhender les changements dans les pratiques de conception	9
Introduction de la première partie	9
1 La conception d'infrastructures : la problématique des échelles et les changements en cours	11
1.1 La question des échelles dans la modélisation des milieux urbains	11
1.1.1 Les infrastructures dans un contexte urbain	11
1.1.2 Le projet <i>Rocade L2 Marseille</i>	16
1.1.3 Les échelles pertinentes et les besoins	17
1.1.4 Le concept générique de « niveau de détail »	19
1.1.5 Les niveaux de détail dans les projets de construction	22
1.1.6 Les niveaux de détail en géomatique	23
1.1.7 Multi-représentation et multi-échelle	24
1.2 Vers un changement des pratiques pour les projets de construction	27
1.2.1 Contexte d'un projet de conception	27
1.2.2 Pratiques du BIM	28
1.2.3 Les principaux projets et acteurs autour du BIM	32
1.2.4 Le changement de paradigme en cours pour les projets de conception	36
1.2.5 Réglementation relative au BIM	38
2 Une problématique de recherche entre la structuration de l'information et la structuration des processus	41
2.1 Les besoins d'interopérabilité et de structuration de l'information	41
2.1.1 Observations sur les deux principaux standards d'échange : IFC et le CityGML	43
2.1.2 La structuration de l'information sur le projet L2 Marseille	44
2.2 Trois pistes pour la standardisation des processus	46
2.2.1 Les Information Delivery Manual	46
2.2.2 Le British Standard et ses documents applicatifs	47
2.2.3 Application du BIM par la définition d'objectifs : le concept de BIM use	48
2.3 La nécessaire considération des ontologies	49

2.3.1	Définition et exemple d'exploitation d'ontologies	49
2.3.2	Conclusion sur l'apport des ontologies	52
2.4	Présentation de la démarche de travail	52
Conclusion de la première partie		57
 Deuxième partie : les concepts et outils pour la structuration de l'information		 61
Introduction de la deuxième partie		61
3	Concepts et formalismes pour la structuration de l'information	63
3.1	La notion de modèle	64
3.2	Une démarche de modélisation en trois étapes	66
3.3	Définition d'éléments supports de l'information	68
3.3.1	Donnés, informations et connaissances	68
3.3.2	Système d'information	69
3.3.3	Interopérabilité	69
3.4	Les Modèles Conceptuels de Données orientés objet	70
3.5	La généralisation de données	72
3.6	La notion de formalisme	73
3.7	L'UML	74
3.7.1	Diagramme de cas d'utilisation	75
3.7.2	Diagramme des classes et des objets	75
3.8	PERCEPTORY : un complément spatiotemporel à l'UML	77
4	L'ingénierie système et la gestion des exigences : éléments d'application	81
4.1	L'ingénierie système	81
4.1.1	Définition de l'ingénierie système	82
4.1.2	Définition de la notion d' <i>environnement</i>	86
4.1.3	Processus d'utilisation des concepts et méthodes de l'ingénierie système	88
4.2	L'ingénierie des exigences	88
4.3	Concepts et outils au service du projet	96
4.4	Le <i>système à faire</i> dans son environnement de projet	97
4.5	La place de notre proposition de MCD par rapport à l'infrastructure physique	98
4.6	La places des Objet_I dans le projet	99
Conclusion de la deuxième partie		101
 Troisième partie : Adaptation des concepts existants de niveaux et proposition d'un modèle conceptuel de données pour les projets d'infrastructures		 105
Introduction de la troisième partie		105
5	Les concepts existants de structuration de l'information par niveaux	107
5.1	Le concept de Level Of Detail (LOD) de CityGML	107
5.1.1	Définition du concept de LOD de CityGML	108
5.1.2	Les utilisations possibles des LOD de CityGML	110

5.1.3	Analyse et observations sur les LOD de CityGML	112
5.1.4	Propositions de compléments aux LOD de CityGML	122
5.1.5	Conclusion de l'analyse des LOD	124
5.2	Le concept de Level Of Development pour la construction	126
5.2.1	Définitions et utilisations du concept de niveau de développement	126
5.2.2	Analyse et observations sur les LODt	132
5.3	Le concept de Level Of Definition pour les projets de conception d'infrastructures	136
5.4	Analyse comparative	140
5.4.1	Analyse comparative des concepts de LOD et de LODt	140
5.4.2	Sous-concepts communs entre niveaux	142
5.5	Conclusion sur l'analyse des niveaux pour la structuration de l'information	143
6	Modèle conceptuel d'objet structuré par les LOXi	145
6.1	Exploitation des niveaux de Communic	146
6.1.1	Décomposition en espace	146
6.1.2	Décomposition en systèmes	146
6.2	Définition des LOXi retenus pour le MCD	149
6.2.1	Niveau d'abstraction (Level Of Abstraction, LOA)	150
6.2.2	« Niveau de détail » (Level Of Detail, LOD) et Niveau d'information (Level Of Information, LOI)	151
6.3	Notre proposition de LOXi dans les trois axes de la modélisation	151
6.3.1	Le cas de CityGML et des LOD	152
6.3.2	Le cas des IFC, des LODt et des BIM uses	152
6.3.3	Intégration de notre proposition de LOXi dans la démarche des trois axes de la modélisation	153
6.4	Mise en cohérence des structuration des exigences et des Objet_I	154
6.5	Proposition d'un modèle conceptuel pour Objet_I en cohérence avec les LOXi	157
	Conclusion de la troisième partie	161
	Quatrième partie : Implémentation et validation du modèle conceptuel dans un contexte industriel	165
	Introduction de la quatrième partie	165
7	Définition et utilisation des BIM uses	167
7.1	Le concept de <i>BIM use</i>	167
7.1.1	Proposition de définition du concept de <i>BIM use</i>	167
7.1.2	Contextualisation du concept de BIM use pour les projets d'infrastructure	169
7.1.3	Objectifs de cette approche par les BIM uses	171
7.2	Formalismes utilisés pour les expérimentations	172
7.2.1	Le BPMN : Business Process Model and Notation	172
7.2.2	Le SADT : Structured Analysis and Design Technique	172
7.3	Le cas des études acoustiques	174
7.3.1	Méthodologie d'étude	174
7.3.2	Définition des besoins	176
7.3.3	Développement des exigences : élucidation et sources d'exigences	179
7.3.4	Liste des objets utilisés pour l'étude acoustique : lien avec les Entités fonctionnelles et les Systèmes du projet	179

7.3.5	Analyse des processus de transformation de l'information	181
7.3.6	Synthèse et conclusion pour ce cas d'usage	183
7.4	Le cas de la préparation à l'audit de sécurité	184
7.4.1	Cas d'utilisation	185
7.4.2	Contexte réglementaire et contractuel	186
7.4.3	Exigences liées à la sécurité : la question des dispositifs de retenue	188
7.4.4	Éléments sur d'autres objets concernant l'audit de sécurité	190
7.4.5	Analyse et conclusion de ce cas d'usage	194
8	Analyse de l'application du MCD	197
8.1	Analyse de la réponse du MCD face aux sollicitations des cas d'usage	197
8.1.1	MCD proposé pour les Objet_I	197
8.1.2	Pertinence de la redéfinition des différents types de niveaux	200
8.2	Applicabilité de notre proposition	201
8.2.1	Applicabilité de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences	201
8.2.2	Application de ces outils conceptuels et exploitation des BIM uses	202
8.3	Modifications à apporter à la première proposition de MCD	202
	Conclusion de la quatrième partie	207
	Conclusion générale et perspectives	209
	Contenu et apports de nos travaux	209
	Élargissement et adaptabilité de notre proposition	210
	Perspectives et pistes de recherche	212
	Bibliographie	219
	Glossaire	231
	ANNEXES	236
A	Éléments de définition des standards IFC et CityGML	239
A.1	Les Industry Foundation Classes (IFC)	239
A.1.1	Observations sur les IFC	239
A.2	Le standard CityGML	240
A.2.1	Définition de CityGML	240
A.2.2	Utilisation de CityGML	241
A.2.3	Observations sur le CityGML	243
A.2.4	Un modèle basé principalement sur le bâtiment ?	245
A.2.5	Faiblesse sémantique	245
A.2.6	Le CityGML pour la modélisation d'infrastructures	245
A.2.7	Problématique de la multiplication des ADE	246
A.2.8	Perspectives d'évolution : CityGML 3.0	246
A.3	Complément de comparaison entre IFC et CityGML	247
B	Tableau comparatif des trois paradigmes de la conception	249
C	Structuration des objets sur le projet L2 Marseille	251
D	Éléments de définition de MADS : Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles	253

E	Étapes d'application de l'ingénierie des exigences	255
E.1	Développement des exigences : élucidation	255
E.2	Développement des exigences : analyse	256
F	Représentation et visualisation de l'information	259
F.1	Visualisation et représentation de l'information	260
F.2	Représentation du flou de l'information	263
G	Application de la proposition de modification des LODef	265
H	Application de notre proposition de structuration d'un projet	267
I	Workflows des objets du cas de l'étude acoustique	271
J	Éléments complémentaires pour le cas d'usage de la préparation à l'audit de sécurité	277
	Table des figures	283
	Liste des tableaux	290

Introduction générale

Contexte de la recherche

Le développement continu de l'urbain nécessite la construction et la gestion d'infrastructures de tous types (infrastructures de transport, des réseaux d'énergie et de matière, etc.). La grande ville occidentale est passée en 150 ans du statut de « pedestrian city » à celui de « network city » : la ville est un ensemble de plus en plus complexe de réseaux et d'infrastructures comme l'évoque G. Dupuy depuis de nombreuses années [Dupuy, 1991]. Ces derniers constituent le squelette de la ville. Les services urbains et le fonctionnement des villes reposent de manière plus ou moins directe sur ces infrastructures. Des dépendances fortes existent entre elles du point de vue de leur gestion [Toubin *et al.*, 2012 ; Toubin, 2014] et de leur fonctionnement [Rinaldi *et al.*, 2001]. Le génie urbain est défini comme l'art de concevoir, de réaliser et de gérer transversalement l'ensemble des réseaux techniques urbains [Diab, 2000]. C'est à la fois un ensemble de pratiques, de professionnels et un domaine de la recherche urbaine Thibault [2000]. Il cherche également à améliorer la productivité et l'efficacité des aménagements et services urbains en associant des pans de l'analyse urbaine jusque-là séparés : choix techniques, structure spatiale, intercommunalité, etc. [Choay et Merlin, 2010]. Nous nous intéressons à la conception des infrastructures, et plus spécifiquement aux infrastructures linéaires routières en milieu urbain. Ainsi, la modification d'une infrastructure existante ou la conception d'une nouvelle infrastructure impactent directement le fonctionnement technique et spatial du milieu urbain. La prise en compte de l'environnement existant est indispensable, à toutes les échelles comme nous allons le voir. **Ainsi, nous inscrivons notre recherche dans une approche technique du génie urbain.**

Force est de constater que l'intérêt pour le design urbain s'accroît fortement [Gil *et al.*, 2011]. Mais contrairement à d'autres constituants de la ville comme les bâtiments, les infrastructures ont un rapport complexe à l'espace. Leur étude s'effectue au travers d'approches et d'échelles de décision variées. La question des échelles² est récurrente dans l'analyse du milieu urbain. Évoquons par exemple la considération des interactions entre les trames vertes et un projet d'infrastructure. Ce sujet fait intervenir des acteurs à plusieurs niveaux administratifs. La pluralité des acteurs avec des objectifs locaux ou nationaux amène à une perte de cohérence écologique [Cormier, 2011]. Ainsi se pose la question de la définition d'un modèle commun qui considère à la fois des points de vue différents portés sur l'espace et le projet, et les diverses modélisations subséquentes. Mais les spécificités métiers nous éloignent d'une modélisation commune. Pour les projets de conception d'infrastructures, les besoins

2. Précisons dès maintenant que l'échelle est définie comme un « facteur d'homothétie entre la taille sur le terrain des entités et la taille de leur représentation sous forme d'objet sur une carte ». C'est donc le rapport entre la *taille sur la carte* et la *taille sur le terrain* [Ruas, 2004]. Cette précision est nécessaire pour ne pas confondre l'expression commune de « grande échelle » qui signifie « une échelle large » comme celle du territoire, alors qu'en vérité, la valeur de l'échelle pour l'étude du territoire est très petite, aux environs de 1/50000 voir 1/100000. C'est également le cas pour l'expression « petite échelle » pour la considération d'un quartier par exemple, alors qu'en réalité l'échelle est plus grande que celle de l'étude du territoire.

en information des parties prenantes sont à la fois nombreux et variés. Contrairement à un bâtiment, une infrastructure s'insère à la fois dans l'espace et dans le fonctionnement des systèmes existant de manière différente selon l'échelle considérée. [Hamilton et al. \[2005\]](#) par exemple ont travaillé sur la manière d'intégrer des ensembles de données décrivant le milieu urbain à plusieurs échelles. Parmi les questions non traitées dans ces travaux, une nous intéresse particulièrement : elle concerne les besoins en informations des parties prenantes d'un projet ainsi que le découpage de cette information entre les partenaires. En effet, même s'il est possible d'intégrer énormément de données dans un unique modèle numérique, lesquelles sont réellement indispensables ? Lesquelles ne font que complexifier le modèle et la gestion des données sans l'enrichir ? La cohérence entre ces différentes sources est-elle conservée ? Cela nous amène à la question du « niveau de détail » de l'information manipulée. Le fait de descendre à un niveau de détail très fin nécessite dans la gestion de l'information, la mise en place d'interfaces et de possibilités de plus en plus ciblées pour répondre aux besoins fonctionnels de chaque corps d'état [[Sacks et al., 2010](#)]. Cette gestion de l'information à modéliser est généralement liée à l'échelle de travail. Cette dernière s'étend des échelles pour l'aménagement du territoire aux plus grandes échelles pour décrire les plus petits constituants d'un projet. Cette question de l'échelle est récurrente et semble diriger les modélisations de l'information. Ce n'est pourtant pas le critère fondamental pour orienter une modélisation comme nous allons le voir.

Les projets d'infrastructures s'insèrent dans un environnement existant complexe et dense du point de vue physique (réseaux, ouvrages, bâtiments, etc.) et informationnel. Les regards portés par chaque acteur sur le projet et son environnement, à plusieurs échelles de décision, de travail, sont accompagnés d'une modélisation qui traduit la représentation qu'ils se font de la réalité. Chaque acteur développe une représentation cognitive de l'ouvrage à construire par rapport à ses objectifs contractuels de conception. Dans ces projet, les problématiques d'échelles s'accompagnent d'incompatibilités dans les modélisations, les échanges et la gestion des données. De ce fait, apparaissent des problèmes d'interopérabilité³ [[Hamilton et al., 2005](#)]. Les niveaux de détail de l'information ainsi que les multiples représentations des objets échangés sont à adapter aux besoins des acteurs. Cela concerne autant la modélisation que les échanges d'informations.

L'évolution vers le numérique du monde de la construction (Bâtiments et Travaux Publics, BTP) s'écrit sur une histoire assez longue. Au cours des années 1980, avec le développement des grands projets d'infrastructure linéaire (autoroutière et trains à grande vitesse), l'ingénierie française publique et privée s'est appropriée, en les développant par elle-même, les outils de modélisation 3D, de conception assistée par ordinateur (CAO) et d'information géographique (modélisation des données environnementales). Durant une longue période, les spécificités de cet univers numérique des projets d'infrastructures l'ont fait vivre de façon autonome. Elles sont de plusieurs natures comme illustré ci-dessous.

- La taille des projets, des coordonnées et donc des données : la taille d'une infrastructure est de l'ordre de la centaine de kilomètres, qu'il faut considérer avec une précision supérieure au millimètre.
- Le géo-référencement des données : en plus d'être dans un espaces de taille importantes, les données sont reconnues à la fois dans l'espace réel et dans un repère relatif qui n'est pas orthonormé.
- La rapidité d'exécution : contrairement aux apparences, un projet d'infrastructure est réalisé dans un temps court, dans le cadre de contrats dont la pérennité ne dépasse pas la durée d'exécution (de 3 à 4 ans)⁴.

Le Building Information Modeling (BIM) apparaît aujourd'hui comme une démarche récente. Mais

3. L'interopérabilité est la capacité de deux entités différentes à travailler ensemble sans effort particulier de la part des utilisateurs de ces entités [[Chettaoui, 2011](#)]. Nous y reviendrons.

4. En comparaison d'une production industrielle de type automobile ou aéronautique de l'ordre de une ou plusieurs dizaine d'années, il s'agit bien d'un engagement contractuel très court.

les prémisses de cette approche de la conception sont donc plus anciens. Le BIM résulte en fait d'un changement de paradigme dans la manière d'envisager l'acte de concevoir et de construire. Christophe Gobin fait référence à ce changement au travers de ce qu'il appelle la « constructibilité ». Dans sa vision, le BIM n'est que le moyen final reposant sur un changement de paradigme : « la constructibilité, nouvelle approche pour arriver à créer un milieu urbain plus efficient »⁵. Le BIM concrétise la tentative actuelle de mise en pratique de ce changement avec les outils informatiques et conceptuels qui sont ceux de l'industrie de la construction. Les plus importants challenges de ce secteur sont maintenant axés sur la disponibilité, la transmission et la manipulation d'informations [Gil et Duarte, 2008]. Dans cette optique, cette nouvelle approche de « constructibilité » est en ligne avec ce que développent d'autres industries, tant en terme d'outils que de méthodes ou de concepts. Elle permet une amélioration des processus par une démarche d'ingénierie concourante et une vision centrée sur le modèle. La conséquence est une augmentation de la qualité et donc de la valeur de l'information. Mais cette application du BIM pour les projets d'infrastructure se confronte aujourd'hui à de nombreux points bloquants.

L'information, matière centrale de ce nouveau paradigme, est soumise à un premier paradoxe⁶. Elle doit être partagée alors qu'elle est de plus en plus considérée comme une marchandise. Elle a une valeur en fonction de sa qualité, de sa précision ou de son exactitude. Par contre, la détention de l'information signifie également détenir le pouvoir d'influencer, de décider, d'avoir un avantage concurrentiel certain. En adoptant une vision plus resserrée sur la déjà courte période de conception par rapport à tout le cycle de vie d'une infrastructure, Gobin [2001] nous apporte un premier éclairage, toujours d'actualité. L'ensemble des désagréments de type mauvaise qualité d'exécution ou incidents divers dus à des mal-façons par exemple se double des dysfonctionnements que les professionnels reconnaissent exister entre eux comme la reprise systématique des plans, la mauvaise compréhension ou les pertes d'informations. Le BIM doit permettre de limiter ces perturbations récurrentes. La difficulté actuelle à évoluer réside dans le fait que ce potentiel d'amélioration est réparti entre tous les intervenants et que la balance entre bénéfice et investissement n'offre pas le même rapport à toutes les parties prenantes des projets de construction. Il s'agit d'un constat fondamental qui distingue le secteur de la construction des industries manufacturières. Dans ce contexte, comment structurer l'information de manière collective pour répondre au mieux aux besoins pour lesquels le projet est lancé ? Comment harmoniser les processus pour lisser ces déséquilibres ? De plus, pour exploiter l'information de cette façon, ce qui lui donnerait une réelle valeur, sa structuration dès le début d'un projet est indispensable pour être en accord avec les structurations existantes. En effet, un projet d'infrastructure s'intègre à la fois dans un environnement réel mais également dans un environnement de modélisation, dans une structuration de l'information existante ou imposée au travers par exemple de la directive européenne Inspire ou au sein même des entreprises.

Objectifs et questionnements de recherche

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode et des outils conceptuels pour identifier et structurer les échanges d'informations pendant la conception d'une infrastructure routière. Ce travail de recherche s'est déroulé en lien avec le projet national MINnD (Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables) qui a pour optique de développer le BIM pour les infrastructures. Ce dernier s'inscrit dans la continuité du projet ANR Communic⁷.

5. D'après Gobin, https://www.youtube.com/watch?v=QFpYKf30ze4&list=PLcns9K_E0E12UotZz-Uua1P4wavPa3N-K&index=3

6. Un second paradoxe sera évoqué dans le premier chapitre.

7. Le projet Communic avait pour objectif d'étudier les différentes étapes d'un projet en cherchant à favoriser le travail collaboratif entre les acteurs directs d'un projet d'infrastructure (gestionnaire de patrimoine, concepteurs, constructeurs, exploitants, financeurs...), à évaluer les performances et les impacts environnementaux, économiques et sociétaux et à promouvoir la communication avec les acteurs influents tels les élus, l'administration ou les riverains [Communic L1, 2010].

Notre objectif est de contribuer aux processus de production et à la structuration de l'information pour un travail en ingénierie concourante au travers d'un modèle conceptuel de données. Nous concentrons notre réflexion sur les interactions entre les trois ensembles suivants :

- les enjeux du projet et son intégration dans un environnement existant, physique et informationnel,
- les acteurs en lien avec le projet,
- les échelles de travail et les modélisations des objets du projet.

La modélisation d'une infrastructure pour faciliter les processus d'ingénierie concourante et l'interopérabilité dans les échanges d'information reste un problème complexe avec des réponses uniquement partielles. Dans la recherche autour du BIM, ces sujets sont traités de manière détaillée mais séparée. Il manque une approche plus globale qui considère à la fois l'information, la réponse aux exigences du projet et la structuration des échanges face aux multiples points de vue que les acteurs portent sur le projet d'infrastructure urbaine. Nous proposons donc une structuration de l'information pour en améliorer sa valeur. Pour cela, notre réflexion se base sur la réponse aux exigences du projet et de son environnement, et sur la considération des systèmes du projet et de son environnement.

Dans ce contexte, de nombreux verrous apparaissent. Émerge en premier lieu la question de la création, de la structuration, de la modélisation et des échanges d'informations dans les activités de conception pour communiquer avec les modèles existants de gestion de l'information comme la directive Inspire. Ainsi, pourquoi les modèles actuels (ouverts et interopérables) ne sont-ils pas ou peu appliqués concrètement ? Sont-ils suffisants et pertinents pour couvrir les besoins de la profession et assurer une continuité vers l'exploitation du territoire ? Comment se rattacher aux structurations et points de vue existants comme ceux de la directive Inspire et ceux de la conception, environnement appelé le BIM ? Comment les connecter et les utiliser simultanément sans recouvrement ni multiplicité des données ? Peu de travaux en cours sur ces sujets proposent des solutions conceptuelles sur l'organisation des données. Certains concepts comme les niveaux de détail existent mais ils tentent d'apporter des solutions trop génériques. Ils n'offrent que de faibles possibilités de prise en compte de la diversité des projets d'infrastructures. Seuls des points de vue généraux sont considérés. Une autre solution régulièrement évoquée consiste à utiliser des ontologies⁸ pour faciliter la structuration de l'information en considérant la sémantique spécifique à chaque métier tout en conservant une cohérence globale dans la modélisation du projet. Mais les ontologies seules ne suffisent pas. Un cadre applicatif de leur structure sémantique, comme un modèle conceptuel de données, est nécessaire. Notre recherche décrite dans ce mémoire vise à définir un tel modèle. Au travers de la résolution des questionnements ci-dessus, il s'agit de faciliter l'appropriation du numérique pour la construction du milieu urbain. Cette dernière nécessite une certaine homogénéité dans les points de vue portés sur la ville et ses infrastructures mais elle est freinée par les jeux d'acteurs et d'échelles qui sont le propre du génie urbain. La question du « niveau de détail » dans l'information modélisée est récurrente dans toutes les analyses spatiales et sa résolution comme nous allons le voir n'est pas triviale. En lien avec les objectifs de ce travail de thèse, un élément central consiste en l'analyse détaillée de ce concept de « niveau de détail » et en une mise en parallèle avec un concept similaire pour les projets de conception, le « niveau de développement ». Cette comparaison est indispensable dans notre travail puisque pour évaluer l'intégration d'une nouvelle infrastructure dans un milieu urbain, l'utilisation de données modélisant l'existant, avec un « niveau de détail » approprié, constitue la base des études. Ainsi, nous proposons de résumer notre problématique de recherche par les interrogations suivantes : **comment adapter les processus de conception d'infrastructures routières urbaines aux besoins informationnels du projet ? Quels outils conceptuels de définition des échanges entre acteurs et de structuration de l'information sont à mettre en place ?**

8. On peut caractériser une ontologie comme une structuration des concepts d'un domaine. Ces concepts sont rassemblés pour fournir les briques élémentaires et exprimer les connaissances dont on dispose dans ce domaine [Bachimont, 2006].

Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq parties. La première partie fait état des pratiques actuelles de modélisation pour la conception d'infrastructures. Elle décrit également les changements en cours dans la manière de considérer l'information dans les activités de conception. Les principales parties prenantes qui font actuellement évoluer le BIM au niveau national et international y sont présentées. Cette première partie se termine sur la définition plus précise des besoins non satisfaits et qui nécessitent un travail de recherche sur la définition des échanges informationnels. La deuxième partie explore certains outils conceptuels et méthodes d'autres industries identifiées comme susceptibles de répondre à nos propres problématiques. Cette partie décrit le processus de réflexion et les outils qui permettent de poser le problème à résoudre. Elle contient donc les éléments méthodologiques de notre proposition de modèle conceptuel. Ainsi sont identifiés les besoins auxquels les concepts de niveaux de détail et de développement doivent permettre de répondre. La troisième partie est une étude détaillée des éléments existants pour la structuration de l'information. Nous analysons ces présents concepts de niveaux de détail entre autres types de niveaux. A l'aide des éléments de la partie précédente, cette troisième partie se termine avec une proposition de modèle conceptuel de données en cohérence avec la structuration des exigences du projet et en utilisant une nouvelle proposition de définition des niveaux étudiés. La quatrième partie décrit les expérimentations qui permettent d'évaluer la pertinence de notre proposition et l'utilité des outils et concepts importés d'autres industries. Elle se termine par la description des apports de la pratique qui imposent des modifications à notre proposition de modèle conceptuel. La cinquième et dernière partie fait état de nos conclusions. Elle évoque les perspectives ouvertes par ce travail et les pistes qui restent à explorer pour permettre une réelle continuité dans l'information de modélisation.

Des précisions sur la structure du mémoire seront apportées à la fin de la première partie, en lien avec notre méthodologie de travail détaillée ci-dessous.

Évoquons dès maintenant la présence d'un glossaire en page 231. Il décrit les acronymes utilisés dans le texte ainsi que certains termes spécifiques clés. Il contient également la description des objets techniques évoqués dans les expérimentations de la quatrième partie.

Première partie

APPRÉHENDER LES CHANGEMENTS DANS LES PRATIQUES DE
CONCEPTION

Introduction de la première partie

La modélisation 3D des projets n'est absolument pas nouvelle. Dans la planification urbaine, les modèles informatiques et systèmes d'information sont utilisés depuis les années 1950 [Batty *et al.*, 1998]. Rappelons également que la modélisation urbaine est une pratique qui a battu son plein au cours de la période 1950-1970 [Picon, 2013]. Mais encore aujourd'hui, l'industrie de la construction peine à répondre aux nouvelles problématiques de la conception avec les outils qui sont actuellement les siens. Ces outils ont évolué : ils sont plus performants et permettent de plus en plus les échanges d'informations. Mais qu'en est-il des processus qui définissent ces échanges ? D'autres industries affichent une avance certaine sur ces deux sujets [Communic L1, 2010]. Nous détaillons dans cette partie les problématiques liées à la considération des points de vue multiples des parties prenantes d'un projet, à la structuration de l'information et au changement en cours dans les pratiques de conception. Sont identifiés précisément les besoins non satisfaits pour améliorer la continuité de l'information tout au long du projet pour permettre ensuite une meilleure exploitation et une meilleure gestion des ouvrages construits.

Tout d'abord, nous étudions la problématique du lien entre le « niveau de détail »⁹ informationnel, les échelles de travail ainsi que les besoins en informations pour répondre aux exigences de l'infrastructure en conception. Une infrastructure est en relation avec son environnement et avec les autres systèmes urbains. Elle apparaît dans toutes les représentations du milieu urbain mais sous différentes modélisations selon l'échelle à laquelle elle est considérée : les échelles extrêmes sont celle du territoire et à l'opposé celle du détail de réalisation des plus petits composants. Mais d'autres considérations interviennent pour orienter sa modélisation. La question de l'abstraction émerge rapidement lorsqu'il s'agit de proposer une modélisation adéquate pour répondre à chaque exigence du projet. Ainsi, l'échelle ne doit plus être considérée comme le critère principal pour orienter une modélisation. Nous détaillons dans cette partie ces problématiques d'interaction entre les échelles d'observation et les modélisations du projet d'infrastructure et de son environnement.

Ensuite, nous analysons le changement actuellement en cours dans la filière de la construction. Nous verrons la portée de ce qui est un nouveau paradigme pour les projets de conception d'infrastructures de tous types. Aujourd'hui, des outils informatiques mais également conceptuels existent pour faciliter la mise en place de processus collaboratifs mais ils ne répondent pas à l'ensemble des besoins qui permettraient d'arriver à une continuité de l'information sur tout le cycle de vie du projet. Les standards et normes peinent à couvrir ces besoins et à apporter un cadre normalisé. Les premiers retours d'expérience ayant mis en place des outils et processus BIM révèlent plusieurs faiblesses dans l'utilisation de certains concepts fondamentaux pour le BIM : l'efficacité espérée n'est pour le moment pas atteinte.

9. Lors nous écrivons « niveau de détail », cela renvoie au concept que nous définissons plus tard. Lorsque nous écrivons niveau de détail sans guillemets, cela évoque le sens commun du niveau de détail.

Dans le second chapitre, nous abordons un autre volet de notre étude de l'existant. Nous analysons les tendances d'évolution et les outils disponibles pour la définition de processus de gestion des informations de projet. Nous avons en premier lieu une problématique de définition des informations pertinentes à échanger entre acteurs. Cette pertinence est à établir par rapport aux exigences auxquelles le projet doit répondre. Elles proviennent à la fois des performances de l'infrastructure et des contraintes de l'environnement dans lequel elle s'intègre. Nous étudions dans le deuxième chapitre de cette partie les approches qui tentent de définir ce contenu pertinent. Il existe un concept qui vise à identifier l'information pertinente et sa modélisation selon ce qui est étudié ou vérifié : il s'agit des *BIM uses*. Dans un projet d'infrastructure, ces *BIM uses* sont nombreux. Leur contenu dépend des exigences à traiter, des acteurs et métiers concernés ainsi que de l'avancement du projet. Ils définissent un modèle partiel de l'infrastructure qui fait sens par rapport aux sensibilités métiers des acteurs, c'est-à-dire en cohérence avec la représentation que chaque acteur se fait du projet. Par contre, il n'existe pas aujourd'hui de démarche qui permette d'identifier les *BIM uses* et de définir leur contenu. Nous allons étudier les éléments existants pour cette tâche et identifier les manques. Enfin, cette question renvoie à la nécessité de structurer la sémantique de l'information, un même objet pouvant être considéré par deux acteurs mais de manière différente. Ainsi, nous nous posons également la question de l'exploitation des ontologies dans notre proposition de modèle conceptuel.

La conception d'infrastructures : la problématique des échelles et les changements en cours

Plus de trente ans après Simon, nous confirmons cette affirmation. Nous travaillons pour l'amélioration de la science de la conception du milieu urbain. Nous considérons donc des objets ayant une relation particulière à l'espace. Nous allons voir dans cette partie les verrous liés à l'étendue spatiale de notre objet d'étude, l'infrastructure linéaire urbaine, et aux besoins de modélisation et de représentation de cet objet, variants continuellement sur tout son cycle de vie.

1.1 La question des échelles dans la modélisation des milieux urbains

1.1.1 Les infrastructures dans un contexte urbain

Nous proposons une seconde citation, de Dupuy [1991] cette fois, pour introduire plus spécifiquement cette section :

L'organisation de la ville et son évolution, ses modèles et ses utopies, s'appuient très largement sur le développement d'un ensemble de techniques urbaines dont les plus significatives en la matière sont les réseaux techniques urbains, toujours plus nombreux.

En effet, dans le milieu urbain, de nombreux objets, réseaux et infrastructures cohabitent. C'est également l'approche de Thibault [2000] : « la ville, territoire ouvert sur son environnement, est fondamentalement en mouvement, en circulation et donc bâtie avec et autour d'infrastructures ». Ces infrastructures justement, ont des tailles et des impacts très variable selon leur type. Leur gouvernance est répartie entre plusieurs acteurs, à des échelles variables. Les enjeux dont elles font l'objet nécessitent des conceptualisations cognitives hétérogènes. Ainsi, les nombreux objets du milieu urbain se trouvent qualifiés de plusieurs manières : ouvrage, réseau, système selon la sensibilité des acteurs qui s'intéressent à ce milieu hétérogène. Comme évoqué par Diab [2000], l'étude du milieu urbain nécessite de considérer ses composants de deux manières :

1. indépendamment les uns des autres,
2. au travers de leurs interactions avec leur environnement et donc en considérant d'autres disciplines.

Cela implique une confrontation de points de vue et d'échelles de travail. Ensuite, pour des composants comme les bâtiments, l'emprise et l'enveloppe sont physiquement définies. Par contre, les infrastructures sont des systèmes ouverts aux frontières peu claires [Barles *et al.*, 2006]. Les échelles d'analyse se trouvent donc différentes. La qualité et la précision des informations nécessaires sont également différentes et surtout, hétérogènes. Pour ces raisons, la modélisation des données reste un travail délicat.

Considérons par exemple les données environnementales liées au déplacement d'espèces animales pour l'étude des trames vertes et bleues. Elles sont moins facilement modélisables que l'enveloppe d'un bâtiment. Ces données décrivent un territoire bien plus conséquent que la zone d'emprise de l'infrastructure. Pourtant, la caractérisation de la rupture créée par cette infrastructure nécessite des informations précises à une plus grande échelle. La modélisation 3D précise des ouvrages et les dimensions des obstacles pour les animaux sont d'une importance certaine [Jolivet, 2014]. L'identification des échelles pertinentes ainsi que la combinaison d'analyses multi-scalaires est indispensable à l'étude du milieu urbain (aide à la décision, stratégie d'entretien des réseaux, gestion de crises, gestion des risques, etc.) [Thierry, 1999 ; Diab, 2000 ; Bonierbale, 2004].

Avant d'explorer plus en profondeur notre sujet principal d'étude, les infrastructures et leurs modélisations, il est indispensable de définir cet objet aux propriétés variées. D'un point de vue de l'occupant du milieu urbain, une infrastructure peut être vue et décrite comme un lien entre deux économies, un lien social, un enjeu politique, un perturbateur environnemental ou une simple séparation entre deux milieux [Lynch, 1960]. D'un point de vue plus technique, nous retenons la définition suivante extraite de [Choay et Merlin, 2010] :

Une Infrastructure est un ensemble d'installations réalisées au sol ou en souterrain permettant l'exercice des activités humaines à travers l'espace. Elles comportent notamment :

- *les infrastructures de transport : voirie et stationnement, chemin de fer et métros, rivières, canaux et ports, aéroports, etc.,*
- *les aménagements hydrauliques, énergétiques, de communication,*
- *les réseaux divers (eau, assainissement, électricité, gaz, téléphone),*
- *les espaces collectifs aménagés (parcs, jardins, cimetières, terrains de sport).*

On distingue :

- *les infrastructures primaires, qui ont un rôle pour toute une ville ou une région,*
- *les infrastructures secondaires, qui concernent un quartier ou une opération,*
- *les infrastructures tertiaires, qui concernent un groupe de logements, un équipement, une entreprise d'activité etc.*

Nous insistons sur l'expression « à travers l'espace » tout à fait pertinente. Nous verrons que la spatialité particulière des infrastructures est la source de réflexions intéressantes mais également de verrous qui ne facilitent pas l'étude du milieu urbain. Après avoir évoqué les types d'infrastructures, la deuxième partie de cette définition décrit ce rapport à l'espace et son lien avec les services fournis. Cette définition évoque en fait une majorité des composants du milieu urbain. Seuls les bâtiments n'apparaissent pas explicitement : ils sont considérés comme faisant partie de ces infrastructures en permettant leur exploitation (centres de contrôle pour les réseaux divers, centres d'entretien et de surveillance ou gares pour les transports, etc.). Enfin, pour notre contexte de projet, nous considérons également la définition suivante : « une infrastructure est l'ensemble des constructions, des installations et de leur environnement, composant le projet ou l'ouvrage à réaliser ou à exploiter » [MINnD, 2012].

Ces définitions mettent en lumière deux idées. Premièrement, plusieurs types d'infrastructures existent : elles diffèrent dans leur typologie et dans leur morphologie (voir Figure 1.1) :

- « espaces ponctuels » c'est-à-dire avec les deux dimensions de leur emprise au sol ayant le même ordre de grandeur,
- « linéaire peu connectée » comme les réseaux de transport de type autoroute, voie ferrée ou canaux,
- « linéaire connectée » (ou « graphe ») comme les réseaux de transports en milieu urbain ou les réseaux de distribution de services et de flux.

Deuxièmement, ces infrastructures ont des rôles et des impacts différents selon l'échelle de réflexion. Elles sont conçues pour répondre à des besoins à certaines échelles mais ont des impacts non négligeables à

d'autres échelles. Une autoroute urbaine permet de relier rapidement deux points d'une zone urbaine : il s'agit d'une vision à l'échelle de la ville, échelle pour laquelle le projet est créé. Par contre, très localement, cette infrastructure est un vecteur non plus de rapprochement de deux points éloignés mais bien de rupture dans la continuité urbaine [Fund *et al.*, 2015]¹. La question des échelles d'observation fait donc pleinement sens pour les infrastructures linéaires, d'autant plus en zone urbaine.

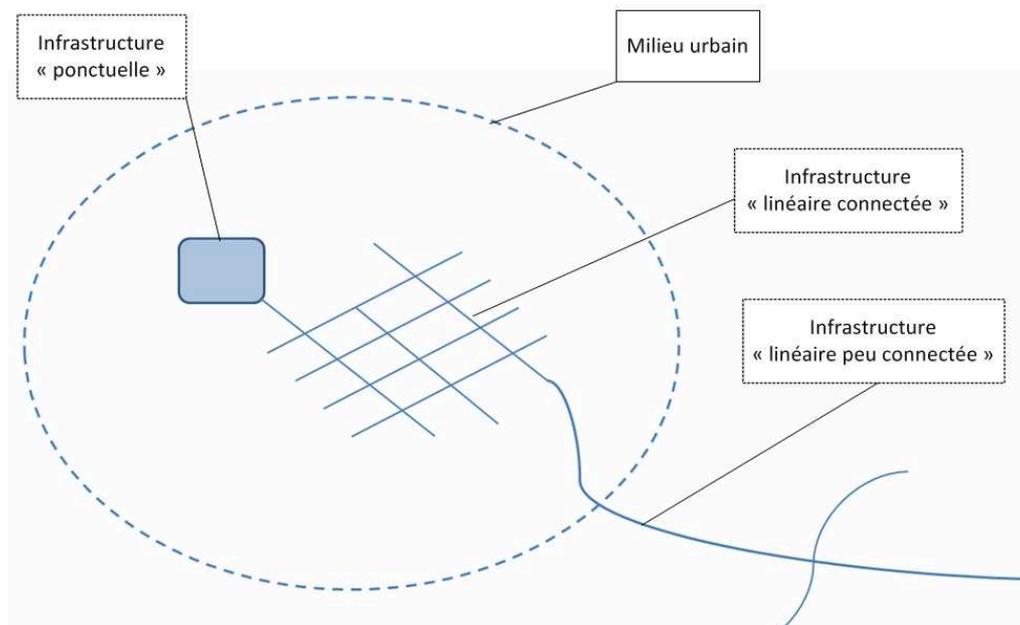


FIG. 1.1 – Illustration des morphologies possibles pour une infrastructure.

Une troisième idée n'est par contre pas mise en lumière dans la définition ci-dessus. Au travers des quatre premiers items, la dimension de système portée par les infrastructures n'est pas explicitement définie. Or, les infrastructures ne doivent plus être considérées comme de simples éléments techniques de l'urbain permettant son fonctionnement. Elles deviennent à la fois actrices et ressources d'un territoire [Barroca et Serre, 2012]. Ces systèmes sur lesquels la ville s'appuie créent l'organisation spatiale du milieu urbain. La ville est un carrefour où tous les composants se nouent [Lhomme, 2012]. Les relations entre les systèmes du milieu urbain sont donc multiples. Ainsi, cette vision de la ville par les systèmes met en lumière leur interdépendance et rend leur considération indispensable [Barroca *et al.*, 2012; Lhomme, 2012; Toubin, 2014]. Cette dimension de systèmes ajoute une complexité complémentaire à la recherche d'une modélisation commune à toutes les infrastructures linéaires, notamment au travers des interfaces entre systèmes et entre métiers. Une infrastructure intègre à la fois :

- des systèmes et des sous-systèmes qui lui sont propres,
- des systèmes et des sous-systèmes du milieu urbain et ce, de manière totale ou partielle (voir la Figure 1.2).

Une infrastructure peut également être traversée par des systèmes urbains existants et potentiellement les perturber. Or, comme l'écrit Dupuy, un système se trouve défini autant à partir de ses sous-systèmes qu'à partir du réseau d'interactions entre sous-systèmes. Par conséquent, les interfaces à considérer entre les systèmes urbains et les systèmes d'une infrastructure apparaissent nombreux, bien plus que lorsque l'infrastructure routière est située en zone peu urbanisée, dépourvue d'un ensemble complexe de systèmes.

1. Sur ce point, nous souhaitons également évoquer la thèse de Marina Fund en cours de finalisation ainsi que le projet ARN CANOPEE (ANR-11-VILD-0003) <http://www.agence-nationale-recherche.fr/> qui a pour thème « Méthodes et outils pour optimiser la programmation, la conception, la réalisation et l'exploitation de couvertures d'infrastructures de transports en milieu urbain. »

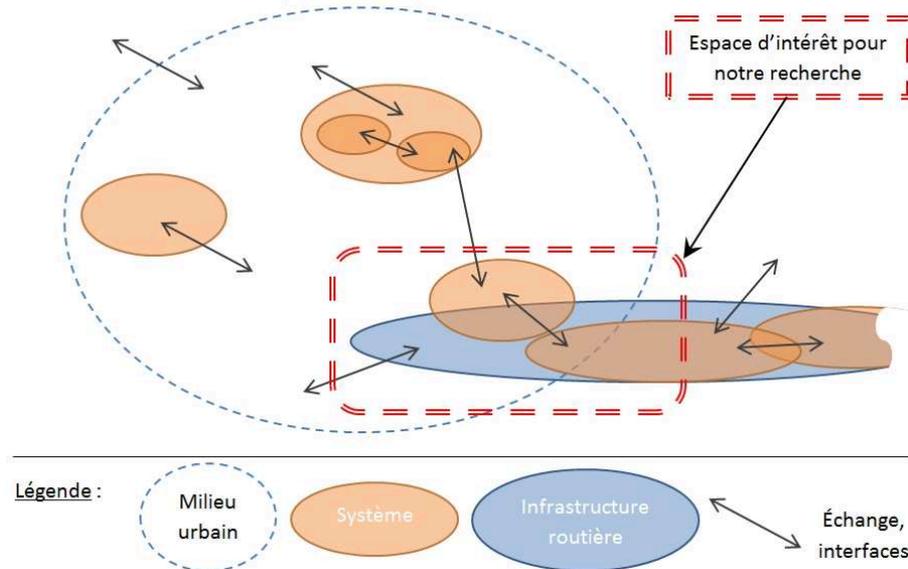


FIG. 1.2 – Les systèmes et l'infrastructure dans le milieu urbain.

Dans notre travail, nous nous intéressons aux infrastructures de morphologie linéaire et de type réseau routier. Donnons les arguments forts qui justifient la pertinence de notre choix.

- Dans un contexte urbain, les infrastructures linéaires comme les routes ou les voies ferrées comprennent un grand nombre d'éléments linéaires : par exemple des clôtures, des bordures, des conduits, des murs de soutènement, des barrières de sécurité ou des réseaux. Ceux-ci peuvent être conçus, construits, entretenus et appartenir à différentes équipes, entreprises, organisations ou clients alors qu'ils interagissent spatialement les uns avec les autres. C'est ce qui fait une des complexités majeures de la modélisation d'une infrastructure routière en milieu urbain (voir Figure 1.2).
- Cette catégorie d'infrastructures comprend un nombre important de systèmes et d'ouvrages complexes comme des routes, des tunnels, des réseaux, du terrassement, des bâtiments, etc. auxquels de multiples acteurs participent (bureaux d'étude, fabricants, constructeurs, entités administratives, etc.).
- Les infrastructures routières proposent un bon équilibre entre les éléments de type génie civil, système, bâtiment, équipement et interfaces avec l'environnement proche, contrairement au rail par exemple qui intègre de nombreux systèmes.
- Cette morphologie est celle qui nécessite le plus de navigation entre les échelles pour considérer tous les objets et points de vue portés sur une infrastructure. Ces échelles vont de celle du territoire à celle des plus petits ouvrages de VRD (Voirie et Réseaux Divers).
- La morphologie des ouvrages composant l'infrastructure linéaire est en fait relative à l'échelle. Un ouvrage d'art (pont, tunnel) considéré seul serait une infrastructure linéaire peu connectée. Par contre, à l'échelle de l'infrastructure entière, un ouvrage d'art ou un échangeur peuvent être considérés comme ponctuels comme le montre le Figure 1.3. Ils sont dits « ponctuels » mais ils restent traversés par divers réseaux et systèmes (assainissement, haute tension, signalisation, dispositifs de retenue, etc.).

Précisons encore notre sujet d'étude. L'espace d'intérêt pour notre recherche est illustré dans la Figure 1.2. Il s'agit de la partie plutôt urbaine des infrastructures routières, bien que la limite matérialisant la fin du milieu urbain (*périurbain, rurbain, suburbain* [Mangin, 2004]) ne soit pas clairement identifiable [Dupuy, 1984 ; Mangin, 2004]. Cette partie sélectionnée est d'autant plus intéressante par rapport à l'infrastructure routière en zone non urbanisée pour :

- ses nombreuses interfaces avec l'existant, que ce soit avec des ouvrages ou avec des systèmes,
- les acteurs et donc points de vue variés à considérer,
- l'applicabilité supposée de notre démarche à une zone moins urbanisée, moins dense : l'inverse, c'est-à-dire adapter un modèle pour une zone moins complexe à une zone urbaine semble *a priori* moins évidente.

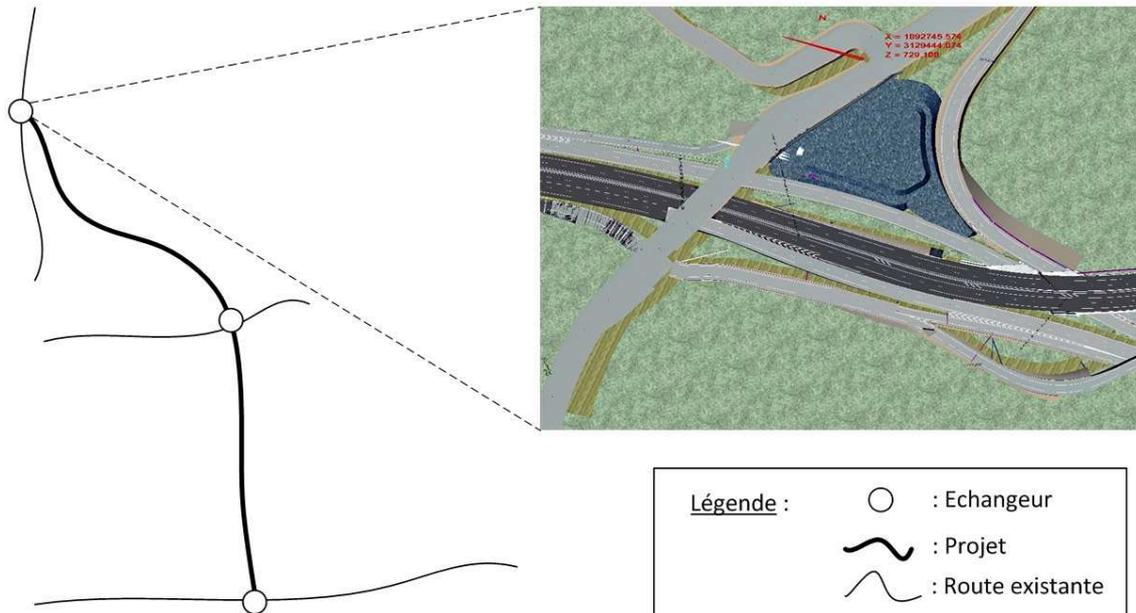


FIG. 1.3 – Exemple du changement de morphologie d'un ouvrage en fonction de l'échelle.

Notre recherche concerne la modélisation d'une infrastructure et de son environnement au sein d'un projet de conception. La modélisation en trois dimensions de la ville [ou des infrastructures] existe depuis plusieurs décennies [Emgard et Zlatanova, 2008]. Toutefois, la modélisation du milieu urbain est aujourd'hui souvent limitée à une simple représentation en trois dimensions des éléments visibles [Nagel *et al.*, 2009] : les données et métadonnées relatives aux objets modélisés sont peu ou pas intégrées, tout particulièrement pour les infrastructures. Pour Billen *et al.* [2008], le premier problème à régler au sujet de la modélisation du milieu urbain, au delà des aspects techniques [qui sont temporaires], est certainement le développement de modèles génériques de l'information 3D urbaine : en effet, d'après les auteurs, les modèles proposés sont souvent le fruit de développements empiriques sans véritable réflexion profonde sur la nature tridimensionnelle de l'espace urbain. Or, un modèle générique est nécessaire afin de développer des infrastructures de données 3D de référence à l'échelle urbaine qui permettraient la mise en commun de l'information et l'adjonction de modèles sémantiques [Billen *et al.*, 2008]. Les modèles les plus avancés décrivent soit uniquement les bâtiments, soit la ville vue au travers du territoire : les infrastructures, comme ouvrages ou comme structure de l'urbain, sont souvent absentes de la réflexion sur la modélisation de la ville. Cela vient en partie du fait que les éléments considérés comme les plus importants dans la ville sont, aujourd'hui encore, les bâtiments comme l'écrivent Lowner *et al.* [2013]. D'autres travaux avec des propos similaires sont référencés dans [Billen et Zlatanova, 2003] bien que les auteurs ne partagent pas cet avis. Nous venons de voir que l'introduction du concept de système est indispensable à l'étude du milieu urbain. Une partie de notre travail consiste à réintroduire la considération des système dans la réflexion sur la modélisation des projets d'infrastructures. Une partie importante de notre travail concerne ce point fondamental : elle sera présentée dans la deuxième partie de ce mémoire.

Avant de traiter plus en détail la question des échelles, évoquons de manière claire que notre travail concerne les infrastructures routières en milieu urbain. Nous traitons du *Projet d'infrastructure*, composé comme nous le verrons plus tard, de l'activité de conception et de l'infrastructure conçue, toutes deux indifféremment appelées *projet* (voir la Figure 1.4). Dans cette figure nous décrivons les liens entre ce projet que nous étudions, les réseaux techniques urbains, réseaux existants dans lesquels l'infrastructure s'inscrit et les données décrivant l'environnement plus large du projet. **Ainsi, par la considération du *Projet d'infrastructure*, nous situons notre réflexion à la convergence de trois domaines (voir Figure 1.4) :**

Le génie urbain : il est défini comme l'art de concevoir, de réaliser et de gérer transversalement l'ensemble des réseaux techniques urbains [Diab, 2000]. Une nouvelle infrastructure modifie les systèmes et réseaux existants. Ces derniers contraignent la nouvelle infrastructure de manières variables selon les échelles auxquelles elle est étudiée.

Le génie civil : nous sommes dans le contexte d'un projet de conception d'infrastructure : l'ensemble des ouvrages, matériaux et méthodes de construction sont étudiées par l'ingénierie du génie civil.

La géomatique : elle est l'ensemble des méthodes et techniques de l'informatique appliquée aux technologies de l'information, moyens d'acquisition, de traitement, de représentation visuelle et d'archivage des données géoréférencées [Conseil National de l'Information Géographique, 1994]. L'impact d'une infrastructure allant jusqu'à l'échelle du territoire, un projet d'infrastructure a besoin de données modélisant l'environnement dans lequel elle s'inscrit. La construction de cette infrastructure modifie le milieu urbain existant ainsi que les données qui modélisent ce dernier.

Nous verrons par la suite que la géomatique nous concerne à la fois du point de vue des données consommées dans un projet d'infrastructure, de leur structuration, mais également du points de vue des concepts propres à ce domaine comme les niveaux de détail ou la généralisation de données. Nous verrons plus bas les problématiques liées à l'utilisation simultanée de données provenant de ces trois domaines avec leur propre logique de structuration.

1.1.2 Le projet *Rocade L2 Marseille*

Tout au long de ce mémoire, nous appuyons notre réflexion sur le projet de rocade A507 à Marseille (ou Rocade L2, ancien nom plus couramment utilisé). Il correspond aux critères évoqués ci-dessus qui rendent pertinent le choix d'un projet d'infrastructure routière en milieu urbain.

Le besoin qui a donné naissance à ce projet à été évoqué dans les années 30 et les premiers travaux commencèrent en 1990. Le projet vise à désengorger le centre-ville de Marseille. Il s'agit d'une section de 10,9 km, divisée en deux zones : une partie Nord à construire entièrement et une partie Est dont les principaux ouvrages de génie civil existent déjà, construits aux normes de l'époque (voir Figure 1.5). C'est donc un projet d'infrastructure urbaine, dans un environnement dense avec une part de remise à niveau de l'existant. Cela fait de ce projet un cas complexe comprenant de nombreux points durs et exigences à satisfaire pour la conception et la réalisation des travaux. Il s'agit d'un PPP signé entre l'État et la Société de la Rocade L2 de Marseille (SRL2), maître d'ouvrage privé en charge du pilotage de la conception, de la construction et du financement de l'ouvrage, puis de son entretien et de sa maintenance pendant 30 ans. Le groupement L2 maîtrise d'œuvre majoritairement composé d'Egis est, quant à lui, en charge de l'ingénierie du projet. Ce contexte contractuel en PPP a également participé au choix de ce projet pour notre travail. En effet, deux acteurs importants du projet, Bouygues et Egis, souhaitaient travailler en collaboration pour le développement du BIM sur ce projet d'infrastructure, ce qui était novateur pour le secteur de la construction.

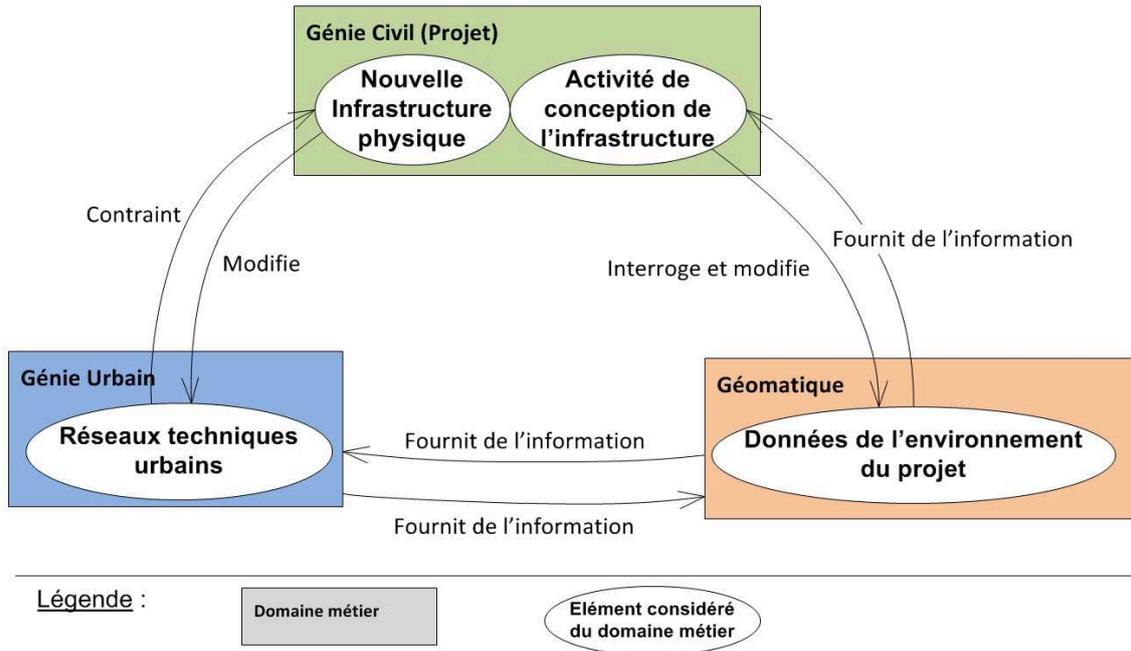


FIG. 1.4 – Triptyque des domaines dans lequel s'inscrit notre recherche. Figure adaptée de [Diab, 2000 ; Bonierbale, 2004].

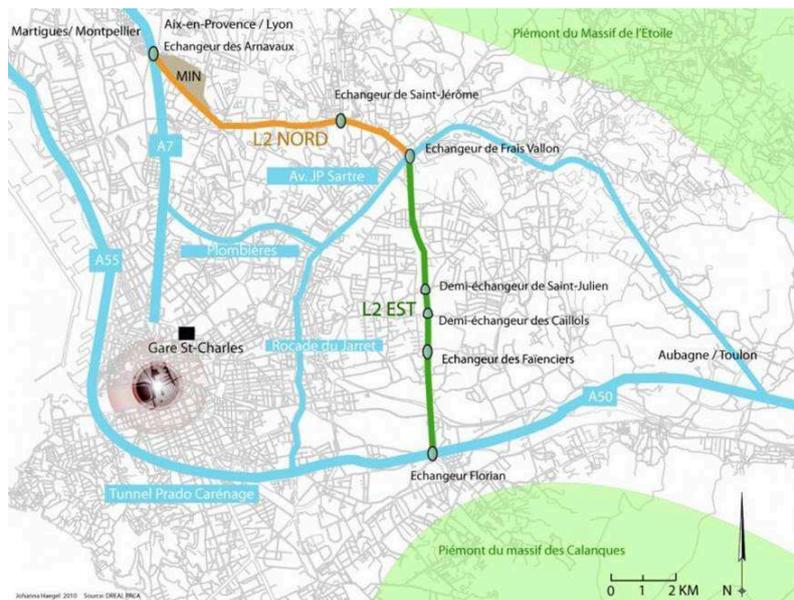


FIG. 1.5 – Plan de situation du projet L2.

1.1.3 Les échelles pertinentes et les besoins

Nous ne rappelons pas ici la définition classique de ce qu'est une échelle. Une définition complète est donnée dans [Ruas, 2004]. Dans son travail sur la représentation de l'espace géographique, A. Ruas évoque la distinction entre ce que l'on retient de la réalité et que l'on va modéliser (le « quoi ? ») et la manière dont cette réalité sera modélisée (le « comment ? »). C'est un questionnement récurrent en cartographie pour la représentation à chaque échelle et pour les transitions entre ces échelles. Dans le sens courant, à un échelle sont liés plusieurs critères : la représentation (ou symbologie), la précision et le détail de ce qui est représenté. L'ensemble de ces éléments constitue implicitement un *point de*

vue ou une *vue métier*. Biljecki *et al.* [2013] rappellent d'ailleurs que l'échelle et le niveau de détail sont généralement confondus, d'où cette ambiguïté. Citons un exemple : Borrmann *et al.* [2012] proposent un modèle multi-scalaire de représentation d'un projet de tunnel. Dans cette proposition, lorsque l'échelle varie, le nombre d'objets modélisés ainsi que leur représentation et implicitement leur précision d'implantation spatiale évolue. Par contre, le tunnel lui-même ne change pas de représentation. Nous reviendrons sur cette proposition mais nous souhaitons dès maintenant évoquer cette interdépendance entre l'échelle de travail et le détail de l'information manipulée. Ce dernier croît dans la modélisation alors que l'échelle de visualisation est constante : le tunnel conserve toujours la même représentation. Ainsi, nous avons un premier verrou à lever qui est l'interdépendance entre des critères de détail, de précision et de représentation et l'échelle de travail.

Ensuite, plusieurs travaux montrent que l'impact d'un projet est plus large que sa seule empreinte physique. Diab démontre par exemple que l'impact environnemental d'un bâtiment nécessite une considération allant jusqu'à l'échelle de la ville qui dépasse largement celle de son unique empreinte physique. Donc l'échelle qui permet de visualiser l'objet d'une étude n'est que rarement celle de son impact réel. L'échelle de visualisation est plutôt une réponse à des besoins d'analyse. L'étude des réseaux d'assainissement nécessite de s'intéresser à toutes les échelles du territoire pour chaque fois des considérations et analyses différentes [Diab, 2000]. Évoquons un autre exemple concernant l'analyse du milieu urbain et la gouvernance des réseaux. Cette dernière nécessite l'utilisation de données spatiales à différentes échelles d'action [Toubin, 2014]. Dans la continuité de cet exemple, Rinaldi *et al.* [2001] expliquent que dans la gestion des systèmes urbains, pour chaque échelle les réseaux sont sujets à certaines interdépendances. Ainsi, le choix d'une échelle de représentation influe sur la représentation mais surtout sur les relations entre les éléments modélisés. Dans les projets d'infrastructures, il y a nécessité de mettre en cohérence des données provenant de sources différentes. Ces données sont multi-scalaires et les relations entre *échelle, représentation, détail et précision* ne sont pas forcément cohérentes : les modélisations à des échelles différentes peuvent être incohérentes. Pour illustrer ce propos, nous considérons une situation classique pour un projet d'infrastructure routière en milieu urbain. Les principales sources de données sont des bases de données décrivant l'environnement existant (géomatique), des relevés terrain plus précis réalisés spécifiquement pour le projet (relevé d'ouvrages ou bâtiments existants, de réseaux) et les données de conception. Le Tableau 1.1 appuie ce propos. Il montre pour ces trois sources d'information, les discontinuités entre la progression de la précision, du détail et de la représentation. Volontairement, nous ne donnons pas de valeurs numériques d'échelle et avons ramené la précision et le détail à des valeurs entre 0 et 1 pour illustrer notre propos de manière simple. De plus, nous ne détaillons pas les termes précision ou détail mais nous verrons qu'il intègrent plusieurs concepts. Utilisons pour le moment les éléments de définition suivants :

- précision : précision d'implantation, de géométrie, des informations sémantiques²,
- détail : détail des composants de l'objet, détail ou complexité géométrique, détail sémantique,

La base de données décrivant l'existant n'a pas une grande précision (échelle petite). Par contre elle contient des informations géométriques et sémantiques, contrairement au relevé terrain. Le pont existant, en interaction avec l'infrastructure à construire, est relevé spécifiquement pour le projet. Ce relevé peut détailler les objets le composant (piles, tablier, culées, etc.) mais n'apporte généralement aucune information sémantique contrairement à la base de données. Par contre, ce relevé est plus précis que la base de données et que l'implantation des objets de la conception en phase AVP (Avant Projet) . Enfin, le relevé terrain ne décrit qu'une petite partie de l'espace à modéliser. Il y a donc cohabitation d'objets caractérisés différemment. Ils n'est donc pas possible de conserver une cohérence sur le détail, la précision et la représentation en fonction d'une échelle lors de l'intégration de plusieurs sources de données.

2. Etude de la nature, de la fonction des objets géographiques, indépendamment des relations de topologie et de composition et par opposition aux descriptions morphologiques et géométriques des objets [Conseil National de l'Information Géographique, 1994].

TAB. 1.1 – Discontinuité des caractéristiques du « niveau de détail » selon la source de la donnée.

Source	Echelle	Précision	Détail	Représentation
Base de donnée (exemple du relevé des bâtiments existants)	a (<b)			
Relevé terrain (ouvrage d'art existant)	b (<c)			
Conception (projet de route)	c			variable avec les phases

AVP : phase avant projet PRO : phase projet EXE : phase d'exécution

Enfin, dans ce dernier paragraphe, nous démontrons que l'échelle de travail ne peut être le point d'entrée pour définir le « quoi ? » et le « comment ? » évoqués ci-dessus. Tout d'abord, c'est la précision souhaitée d'une analyse qui définit la précision nécessaire des données et non l'échelle d'analyse : par exemple, l'étude des interdépendances entre les transports et la puissance électrique disponible s'effectue à l'échelle du territoire : cela n'implique pas que les données utilisées soient peu précises. Ensuite, que ce soit pour l'étude de la ville, pour des projets d'infrastructures ou des projets de bâtiment, ce sont quasiment les mêmes échelles qui sont sollicitées comme le montre le Tableau 1.2. Par contre, pour une même échelle, les analyses et donc les besoins en informations (quantité, précision, détail) varient fortement. De plus, certaines analyses se font en fait à plusieurs échelles avec des données ou plutôt des modélisations différentes. Ainsi, dans un contexte de modélisation 3D, l'échelle dans son sens courant n'a plus de sens [Communic L1, 2010] excepté pour la création de livrables³. L'échelle à considérer correspond au niveau auquel une réalité est observée et modélisée. Il s'agit d'une échelle d'analyse « pertinente » au vu d'un contexte comme l'écrivent Flety et De Sede [2009]. Il existe donc une réelle différence entre l'échelle de visualisation et l'échelle de réflexion, niveau auquel une réalité est observée et analysée [Ruas, 2004]. Les notions de niveau d'abstraction et de pertinence des données selon le contexte et les analyses existent ainsi pleinement. Ils ont tendance à supplanter la notion d'échelle au sens classique comme nous allons le voir dans notre troisième partie. Cette transformation est accentuée par la généralisation du numérique et du 3D et la notion de zoom plutôt que d'échelle d'observation.

Nous allons maintenant évoquer les problématiques liées aux diverses définitions et applications du concept de « niveaux de détail ». Ce concept est fondamental dans la modélisation d'une infrastructure. Nous pourrions ainsi identifier les points bloquant l'utilisation de ce concept par rapport aux besoins de modélisation et de multi-représentation dans les projets d'infrastructures urbaines.

1.1.4 Le concept générique de « niveau de détail »

L'humain, par défaut, décompose tous les objets qu'il voit : Marie-Paule Cani explique cela dans son cours au collège de France [Cani, 2015a] en prenant l'exemple d'une théière. En voyant cet objet,

3. En génie civil, au travers des objectifs contractuels de production de livrables, chaque échelle de livrable correspond aux besoins des différents métiers et acteurs qui vont réaliser les travaux [Kubicki, 2006].

TAB. 1.2 – Échelles considérées selon le type de données avec exemples d'analyses pour illustration.

		Echelles						
		Région, territoire	Ville	Quartier, projet urbain	Ilot, parcelle	Bâtiment, équipement	Ouvrage élémentaire	Détail de conception réalisation
Données de l'existant (géomatique)	Existence des données	oui	oui	oui	oui	oui	rare	non
	Données pour un projet de bâtiment	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Données pour un projet d'infrastructure	Exemple d'analyse	non	Empreinte écologique	Empreinte carbon	Récupération du rayonnement solaire	Accessibilité des secours (sécurité incendie)	Accessibilité personnes à mobilité réduite	Phasage des travaux
	Exemple d'analyse	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Impact sur les continuités écologiques	Impact sur les continuités écologiques	Connexion avec les réseaux existants, interfaces	Etude acoustique	Gestion des emprises du projet	Vérification des gabarits de passage entre véhicules et panneaux, portiques, etc.	Etude de faisabilité des travaux	Réponse aux exigences de performances des équipements de sécurité

l'humain le décompose immédiatement en trois sous-objets (anse, corps et bec). La décomposition est donc plutôt intuitive mais comme nous allons le voir dans cette partie, la difficulté ne tient pas dans la décomposition elle-même des objets mais plutôt dans le sens que l'on donne à chaque niveau complémentaire de décomposition ou de généralisation. Par ailleurs, si l'observateur de cette thèse possède par exemple une sensibilité à la production industrielle d'objet, il aura peut-être une décomposition différente.

La modélisation visuelle 3D, donc la représentation d'un objet, n'est qu'une approche parmi d'autres, une méthode d'étude complémentaire. D'ailleurs, elle serait d'autant moins prédictive que le niveau de

détail du modèle est faible [De Rosnay, 1975]. L'objectif n'est pas de critiquer cet ouvrage de De Rosnay ni cette affirmation écrite pour un contexte général mais nous allons voir que ce n'est pas exactement vrai dans notre contexte. La qualité de l'exploitation d'une modélisation n'est pas totalement corrélée à la précision de cette modélisation. Trop de détail peut perturber le travail de modélisation et d'analyse.

Le concept de « niveau de détail » existe dans de nombreux champs disciplinaires mais il véhicule des significations différentes. Dans les projet d'infrastructures, les nombreux acteurs apportant des données ont des sensibilités différentes. L'utilisation de données créées en considérant des définitions différentes du « niveau de détail » pose des problèmes de cohérence. Cette section concerne les utilisations courantes du concept de « niveau de détail ». Nous traitons ses définitions dans un contexte de projet de construction et de géomatique pour finir sur leurs relations avec les concepts de multi-échelle et de multi-représentation. Au travers de ce travail, nous étudions les points de convergence ou de divergence entre ces définitions avec comme objectif premier, l'évaluation des apports possibles de ces concepts pour la structuration de l'information dans les projets de conception d'infrastructures urbaines.

Le niveau de détail concerne au départ la modélisation et la visualisation de données de manière générale. Il s'agit de l'utilisation la plus générique de ce concept. Le niveau de détail de modélisation d'un objet correspond à l'approximation faite dans le nombre de polygones utilisés pour modéliser cet objet de manière plus ou moins simplifiée [Luebke *et al.*, 2002]. L'idée première dans les années 2000 notamment, était de réduire la complexité géométrique d'un objet pour augmenter les performances de visualisation sans que l'utilisateur ne s'en aperçoive [Biljecki *et al.*, 2013]. Ce type de niveau de détail est lié à la précision de la modélisation et donc au moyen de lisser la forme à modéliser ou de faire apparaître les détails de la géométrie (voir Figure 1.6 (a)). Il peut être soit discret (modélisation pré-calculée pour différentes plages de distance ou en fonction de l'exploitation de la modélisation) soit continu et donc calculé à la volée pour un niveau de détail dépendant de la distance entre l'objet et son observateur. L'objectif est dans ce cas d'alléger les calculs de modélisation du point de vue informatique mais de toujours conserver une représentation de l'objet similaire pour l'observateur (voir partie (b) de la Figure 1.6). Cette utilisation est courante dans les jeux vidéo par exemple pour de la modélisation 3D en temps réel. La gestion du niveau de détail est indispensable pour optimiser la balance fluidité - qualité visuelle des environnements virtuels. En effet, affiner le maillage pour un rendu plus proche de la réalité implique une plus grande complexité des modèles mathématiques utilisés [Cani, 2015a]. Rossignac [2005] définit plusieurs complexités de la modélisation d'un objet. Elles sont fonction par exemple du degré des polynômes ou du nombre d'éléments nécessaires à la modélisation. Le niveau de détail correspond dans ce cas général de modélisation à différentes simplifications du modèle. Comme l'explique Rossignac [2005], un autre élément à considérer par rapport à ce concept de « niveau de détail » est le passage d'un niveau à l'autre : il peut être discret ou continu. Ajoutons également qu'il n'est pas nécessaire d'avoir les mêmes règles de simplification et de modélisation pour tous les objets et donc le même « niveau de détail » : les objets importants d'une scène virtuelle peuvent être modélisés avec un meilleur « niveau de détail » que d'autres éléments secondaires.

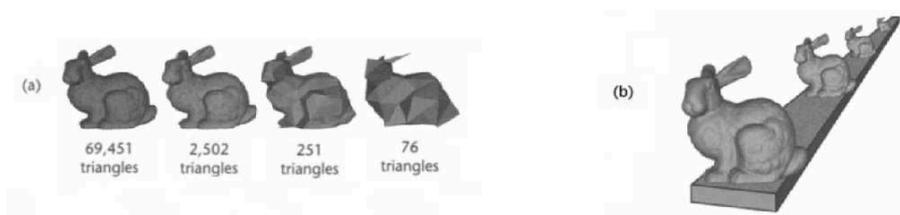


FIG. 1.6 – Illustration du concept de « niveau de détail » pour la modélisation : (a) simplification d'un objet complexe ; (b) définition du « niveau de détail » pour réduire le coût [de modélisation] des objets lointains, petits ou peu significatifs [à partir des objets de (a)], d'après [Luebke *et al.*, 2002] : le rendu pour l'observateur (ici nous même) semble aussi détaillé pour toutes les distances.

Suite à la définition du « niveau de détail » pour la modélisation, le constat est qu'il s'applique à un objet : il n'y a pas d'influence sur la décomposition de l'objet en sous éléments par exemple. Cela vient du fait que (1) nous parlons ici des niveaux de détail de visualisation, qui ne nécessitent pas cette approche plus structurante des objets et de l'information modélisée et (2) la scène modélisée est généralement statique avec des objets fixes qui ne changent qu'en apparence : la notion de décomposition des objets n'existe donc pas dans cette définition du « niveau de détail ». Passons maintenant aux définitions du concept de « niveau de détail » pour les domaines qui nous concernent : les projets de conception et la géomatique.

1.1.5 Les niveaux de détail dans les projets de construction

Les travaux évoqués ici concernent principalement le « niveau de détail » dans les projets de bâtiments. Des constats similaires peuvent être apportés pour les projets d'infrastructures mais il existe peu de travaux dans ce domaine.

Dans le milieu du bâtiment, ce concept est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années mais il a évolué, en lien avec le développement des outils informatiques. Il se réfère à des décompositions plus fines d'objets et de tâches du projet ou à la capacité de créer et d'utiliser différentes représentations d'objets spatiaux à des niveaux de précision et de complexité différents. Pour la première définition, nous pouvons citer des travaux sur l'établissement d'une cohérence entre le niveau de détail de planification et de conception [Mangin *et al.*, 1993 ; Morand, 1994]. La croissance du niveau de détail correspond à une décomposition plus fine des tâches et des objets. Plusieurs niveaux de détail du planning de réalisation des travaux sont proposés en lien avec les phases du projet, d'après [Morand, 1994] :

- niveau 0 ou global ;
- niveau 1 ou enveloppe ;
- niveau 2 ou détaillé ;
- niveau 3 ou très détaillé.

Cette approche du niveau de détail correspond à l'avancement de la conception (la précision est donc implicitement liée à ce concept) et à des besoins de visualisation des acteurs du projet : nous identifions ces deux points comme deux sous-concepts de cette définition du niveau de détail. En parallèle, ils correspondent aux demandes contractuelles et réglementaires de production de livrables papiers, encadrés par la loi MOP.

D'autres définitions existent pour le domaine de la construction. On retrouve par exemple ce concept d'*échelle d'apparition*. Cette dernière est évoquée en 1988 dans le projet Krépis [Ferriès et Léglise, 2006] comme étant un moyen de ne représenter sur un plan que les éléments nécessaires à la compréhension selon les spécificités de chaque métier. Cela signifie que chaque *objet* est défini par une *échelle d'apparition* et qu'il sera modélisé (ou plutôt dessiné) seulement si l'échelle du plan est supérieure ou égale à son *échelle d'apparition* (ou comprise entre deux valeurs d'échelle). Il y a donc une distinction entre le zoom et l'échelle : peu importe le zoom de visualisation, les objets dessinés ou non le restent par rapport à une échelle donnée. Nous avons donc ici un seul concept véhiculé par l'*échelle d'apparition* qui est le besoin de compréhension mutuelle des acteurs du projet (un seul sous-concept). La distance à l'objet n'est donc pas un paramètre qui pilote le « niveau de détail ».

Le concept de « niveau de détail » pour la construction apparaît bien différent de celui dédié à la visualisation décrit en début de section 1.1.4. Aujourd'hui, l'évolution du « niveau de détail » pour la conception se retrouve dans le concept de « niveau de développement », parfois encore appelé « niveau de détail ». Nous étudierons ce concept plus tard. Les relations entre l'échelle, le détail, la précision et la représentation des objets au sein de ce concept seront étudiées et comparées aux autres types de « niveau de détail ».

1.1.6 Les niveaux de détail en géomatique

Nous étudions dans cette section le concept de « niveau de détail » en géomatique. Un projet d'infrastructure consomme des données environnementales et spatiales. Ainsi, cette analyse participe également à la définition du « niveau de détail » pour les projets d'infrastructures.

Dans le travail de Biljecki *et al.* [2013], le *Level of detail* est l'un des concepts clés des SIG et de la modélisation 3D des villes pour décrire la complexité de la représentation des objets géographiques. Cela signifie que ces *Level of detail* sont une manière d'identifier ou de décrire plusieurs modèles qui représentent la même réalité de manière différente, afin d'en faciliter la compréhension de la complexité. Une définition du « niveau de détail » peut dans un premier temps correspondre à la représentation d'un objet selon des besoins (notion de *point de vue* tels que défini dans [Culot *et al.*, 2003]). En reconsidérant la définition ci-dessus de ce qu'est une échelle, définir les niveaux de détail d'observation revient à identifier qu'elles sont les entités significatives (objets) à différentes échelles, quelles sémantiques leur affecter et quels processus leur attacher. En s'appuyant sur d'autres travaux de recherche, Flety et De Sede [2009] utilisent également le terme de « granularité » et l'évoque comme « la capacité de représenter un objet ou processus à différents niveaux de détails, augmentant la flexibilité de la modélisation et les potentialités d'analyse ». La représentation sur des cartes géographiques repose sur le concept d'échelle pour fournir des informations cartographiques avec un niveau approprié d'abstraction [c'est-à-dire en fonction de l'échelle]. Cela permet de réduire la complexité du contenu des cartes, améliorer leur lisibilité et permet au spectateur de se concentrer sur les informations pertinentes [Borrmann *et al.*, 2013]. Culot *et al.* [2003] parlent de *résolution* pour connaître le niveau de détail au-dessous duquel l'objet n'est pas pertinent. Dans ce contexte de représentation cartographique, la représentation ou non des objets est binaire (oui ou non) comme le montre la Figure 1.7.

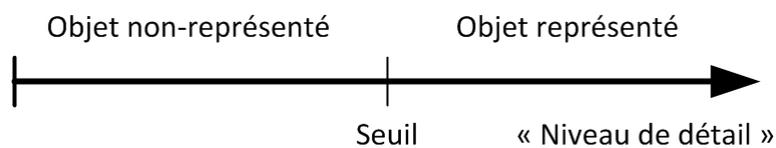


FIG. 1.7 – Illustration de la représentation ou non d'un objet selon la résolution définie dans [Culot *et al.*, 2003].

Trois points sont identifiables comme constitutifs du « niveau de détail » en géomatique :

1. le concept de niveau d'abstraction (« niveau auquel une réalité est observée ») : le lien entre les phénomènes étudiés et l'échelle d'étude a du sens ;
2. en lien avec le point précédent, le sens qui est donné à chaque échelle : les entités manipulées à des échelles spécifiques, ont une sémantique propre à cette échelle et sont définis pour une exploitation particulière ;
3. les liens entre les différentes échelles ont également du sens ; une analyse peut nécessiter des modélisations à plusieurs échelles.

Dans son travail de recherche, Ruas [2004] distingue deux types de niveaux de détail pour les bases de données : le *niveau de détail sémantique* et le *niveau de détail géométrique*. Le premier est défini par la présence ou non de certains objets dans la base de données, et donc implicitement par la manière de décrire et de décomposer la réalité que l'on souhaite modéliser et la précision avec laquelle sont décrits les attributs des objets de la base. Cette précision ne s'applique pas directement à la géométrie elle-même des objets. Cette composante traitant de la précision géométrique est appelée résolution sémantique de la base. Le niveau de détail sémantique d'une base de données exprime « ce que l'on

souhaite retenir du monde réel » (pour une utilisation et un contexte spécifiques). Nous retrouvons ici ce qui est évoqué dans les points 1 et 2 ci-dessus, et donc la question de l'abstraction. Le second, le *niveau de détail géométrique*, est quant à lui relatif à la résolution de la base, c'est à dire à la plus petite unité mesurable ou représentable [Ruas, 2004]. Ce niveau de détail est donc dû à des considérations techniques et visuelles et non à des besoins d'analyse.

Évoquons enfin la notion de *zoom*. Le travail de Parfouru [2008] fait état de deux types de zooms définis dans d'autres travaux. Il évoque :

- le *zoom infini* « permettant un changement d'échelle sans pour autant transformer son contenu » (il s'agit du zoom classique) ;
- le *zoom sémantique*, plus complexe qui introduit des transformations géométriques des objets ainsi que des « opérations logiques » qui modifie la représentation « en fonction du niveau de détail ».

Ce dernier est similaire au niveau de détail sémantique. Toutefois, il existe une différence majeure : le zoom sémantique agit comme un filtre sur la base de donnée, car tous les éléments sont présents dans cette base. Le niveau de détail sémantique, par contre, définit ce qui est dans la base de donnée mais ne gère pas la modélisation qui en est faite. Nous verrons que pour un projet d'infrastructure, nous avons besoins de ces deux outils. Leur définition et leur utilisation doivent donc être définies sans dépendances.

Les travaux évoqués dans les paragraphes ci-dessus proviennent en majorité de la recherche en géomatique. Rappelons que les projets d'infrastructures consomment des données géospatiales. Ainsi, dans un projet de conception, les visions de ce qu'est un « niveau de détail » se confrontent puisque des données de l'existant, à une petite échelle, sont intégrées à des données de conception à une échelle plus grande. Les détails apportés dans notre analyse ci-dessous vont nous permettre de mieux comprendre les problématiques liées au détail à apporter dans les modélisations et les échanges de données pour la conception d'infrastructures.

1.1.7 Multi-représentation et multi-échelle

La notion de multi-représentation est apparue dans le domaine des systèmes d'information géographique dans le but de gérer plusieurs représentations différentes d'une même entité selon différents points de vue ou niveaux de représentation [Mtibaa et Jaziri, 2007 ; Fléty, 2014]. Les instituts de cartographie ont longtemps proposé une gamme d'échelles en y associant un contenu [Ruas, 1999]. En se basant sur plusieurs auteurs, Mtibaa et Jaziri [2007] rapporte que « Dans le domaine de modélisation d'information, le problème de la multi-représentation est connu depuis longtemps au travers de l'utilisation des vues dans les bases de données pour personnaliser l'accès d'un groupe d'utilisateurs. La représentation multiple est la conséquence de la subjectivité de la perception et de la diversité des intérêts durant la phase de modélisation. L'information, peut être une entité sujette à différentes représentations selon le contexte dans lequel elle est considérée. ». Ces éléments résument l'idée de la multi-représentation.

Pour la planification des grands projets d'infrastructure, des échelles très variées sont à considérer pour visualiser des objets allant du kilomètre pour les études préliminaires au centimètre pour la planification détaillée [Communic L1, 2010 ; Borrmann et al., 2012]. De plus, la diversité des acteurs et domaines métier impose des modélisations différentes des mêmes objets. Concernant l'intérêt du multi-échelle pour la ville, les nouvelles applications comme l'exploitation des infrastructures et le management des risques et des catastrophes naturelles pour la ville requièrent des informations précises comme les volumes intérieurs des bâtiments ou les espaces accessibles aux piétons [...] qui ne sont

généralement pas modélisés aux mêmes échelles [Kemec *et al.*, 2009 ; Breunig et Zlatanova, 2011]. Il a y donc nécessité de naviguer entre plusieurs échelles et plusieurs représentations des objets.

Pour la géomatique spécifiquement, Flety et De Sede [2009] décrivent la multi-représentation comme un moyen de modéliser un objet de plusieurs manière selon un *point de vue* ou *niveau de représentation* au sens « d'échelle » défini ci-dessus. Par contre, ces deux concepts peuvent exister indépendamment l'un de l'autre. Plusieurs cas sont possibles :

1. une seule représentation par objet pour plusieurs échelles (cas de l'intégration d'un relevé de l'existant dans un modèle plus large) ;
2. plusieurs représentations d'un objet pour une seule échelle (plusieurs points de vue pour une même analyse : exemple de la Figure 1.8 ;
3. plusieurs représentations pour plusieurs échelles : le cas des LOD (Level Of Detail) de CityGML que nous étudions plus loin correspond à cela avec une relation telle que pour chaque échelle, il existe une représentation particulière ; les relations peuvent être plus complexes : certaines échelles avec plusieurs représentations et des représentations fixes pour plusieurs échelles (cas d'un projet de conception nécessitant une confrontation de points de vues pour des analyses multiples).

Pour Laplanche [2002], la compréhension d'un système est grandement facilitée lorsque qu'il est envisagé selon des angles de vue différents : il a donc un intérêt certain à travailler la multi-représentation des objets. La Figure 1.8 donne un exemple très explicite d'une représentation multiple d'un segment de route selon plusieurs points de vue (appelés « segmentation » dans cette figure). Ensuite, comme l'évoquent Abadie et Mustière [2008], chaque base de données géographique reflète une conceptualisation particulière du monde réel, propre à son producteur. Ce qui signifie que d'une base de données à l'autre, un même phénomène du monde réel pourra avoir différentes descriptions et ainsi induire des incohérences sémantiques. Le fait d'assembler des informations de plusieurs bases de données, comme c'est le cas pour construire un modèle multi-échelle comme un projet d'infrastructure linéaire, implique indubitablement une confrontation des modélisations et donc des points de vue. Comme une majorité des SIG stockent l'information par résolution, la conservation des liens entre un même objet à deux résolutions différentes n'existe pas du fait d'un manque de sémantique indéniable [Mignard, 2012] : c'est ce que nous allons retrouver plus tard dans les Level Of Detail de CityGML. Enfin, les modèles de projets d'infrastructures nécessitent la récupération des données à partir de bases de données SIG mais également du processus de conception. Si la sémantique des différents modèles de données n'est pas cohérente, cet assemblage pour établir une base de données multi-échelle et multi-représentation ne peut rester sémantiquement cohérente. Une piste souvent évoquée pour résoudre ce type de problématique consiste à utiliser des ontologies de multi-représentation [Mtibaa et Jaziri, 2007] (nous détaillons cette approche à la fin de cette partie).

Dans les projets de conception, aux échelles sont souvent attachés d'autres paramètres spécifiques aux métiers. Ainsi, en architecture, un ensemble de conventions admises par tous (les concepteurs et les exécutants d'un plan d'exécution) permettent de lire un document sans ambiguïté, en ne représentant pas tous les objets à toutes les échelles [Ferriès et Légise, 2006]. La multi-représentation est structurée par le savoir-faire et les règles de l'art. Toutefois, avec l'utilisation de nombreux outils informatiques, il est indispensable de redéfinir ces règles de l'art, d'autant plus que les perspectives d'évolution de la profession orientent vers une production de livrables 2D directement à partir des modélisations 3D. Les possibilités de zoom dans une modélisation visuelle 3D perturbe ces anciens principes de représentation [Communic L1, 2010]. Il n'existe pas aujourd'hui de technologie disponible qui soutienne de manière adéquate à la fois le travail collaboratif ainsi que l'aspect multi-échelle pour les projets de conception d'infrastructure [Borrmann *et al.*, 2014]. Notons ici cet argument en faveur de notre approche, détaillée dans la quatrième partie, d'utiliser des cas d'usages afin de décrypter ces nouveaux besoins en représentation de l'information.

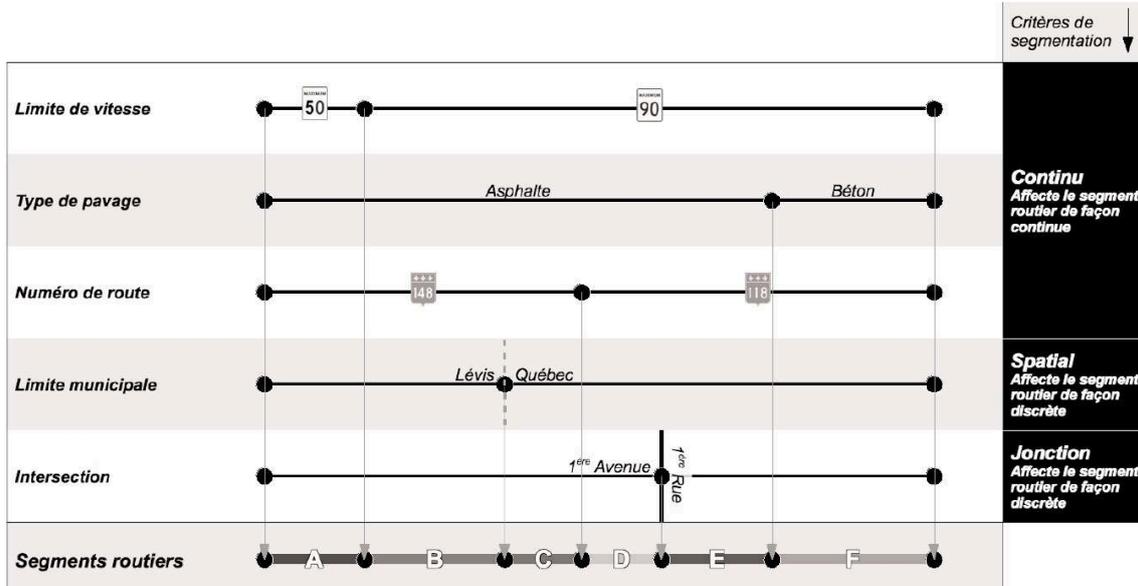


FIG. 1.8 – Exemple de segmentation routière en fonction des besoins d'après [Guillotte et al., 2009].

La question des niveaux de détail est réellement centrale pour la modélisation des projets d'infrastructures urbaines. Peu importe le domaine métier qui traite ce sujet, nous identifions systématiquement une confusion entre point de vue, niveau d'abstraction, vue métier, échelle de travail, détail, précision et représentation ou symbologie. Le « niveau de détail » est simultanément fonction de tous ces éléments. La Figure 1.9 illustre ce propos : à gauche le niveau d'abstraction est lié à la représentation et implicitement à la précision de la géométrie ; à droite la représentation symbologique est liée à l'échelle de travail. Ces dépendances ne peuvent être conservées pour définir un modèle avec une multi-représentation. Nous en détaillerons les raisons dans la troisième partie de ce mémoire.

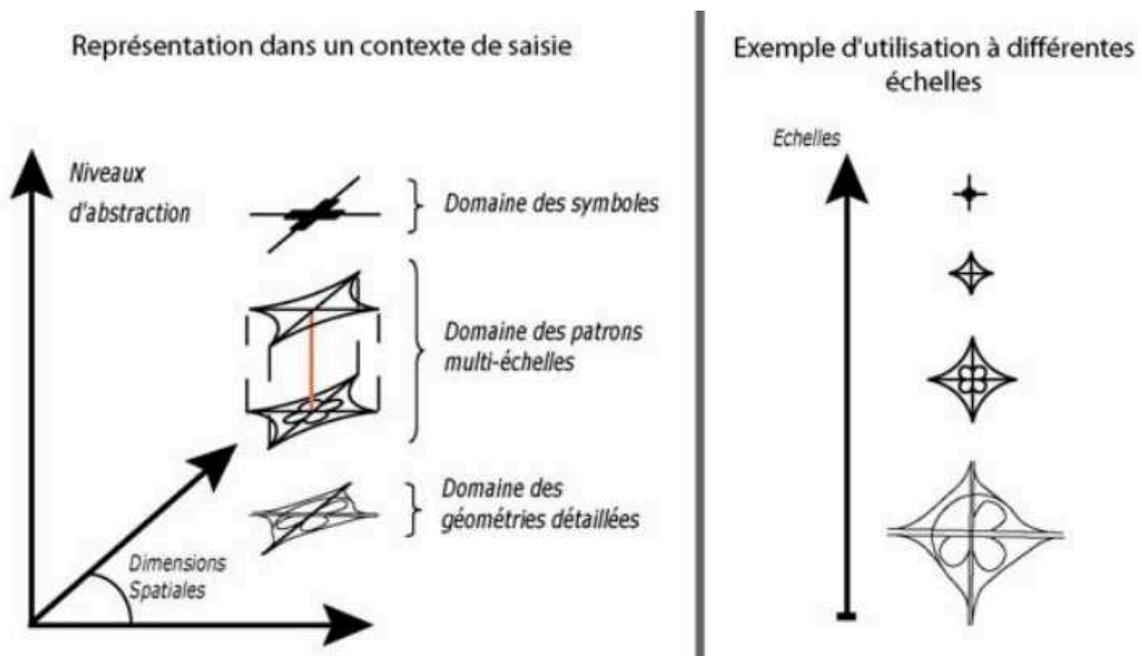


FIG. 1.9 – Illustration de modélisation liant l'abstraction, l'échelle de travail, la précision et la représentation (figure extraite de [Frédérique et al., 2008]).

Nous venons d'évoquer les principaux besoins concernant la modélisation des informations d'un projet d'infrastructure urbaine. Nous avons vu l'importance de produire des modélisations qui répondent à des besoins spécifiques. Les outils étudiés, niveau de détail, point de vue, abstraction, etc., ne sont pas utilisables simultanément dans notre contexte de conception d'infrastructures. Le détail, la représentation, la précision ainsi que la vision portée sur la réalité à modéliser sont liés à l'échelle, ce qui est un point bloquant pour notre réflexion. Nous analyserons plus en détail certains concepts de « niveau de détail » ou niveau de développement utilisés dans notre secteur de la construction pour en définir les limites et proposer des améliorations. Mais avant cela, nous devons clairement définir la question à laquelle ces concepts doivent répondre. Les approximations dans leurs définitions montrent bien le manque de maturité sur ce sujet. De plus, nous devons considérer que notre contexte de travail change au travers des pratiques, de la réglementation et surtout, de la manière d'appréhender la manière de concevoir. C'est le sujet de la section suivante.

1.2 Vers un changement des pratiques pour les projets de construction

1.2.1 Contexte d'un projet de conception

Nous venons d'évoquer des problématiques liées à la modélisation des objets ou de l'information du projet. Intéressons nous maintenant aux processus de conception qui utilisent cette information. Dans un projet de conception, tout concepteur doit faire face au « paradoxe du processus de conception » évoqué dans [Diab, 2000]⁴. En se basant sur [Adolphe, 1991], Diab explique que dans les phases amont, l'information disponible est la moins précise. Or, les choix faits lors de ces phases sont prépondérants sur le déroulement et le coût du projet. Par contre, lorsque l'information est la plus précise et la plus aisément disponible, à la fin de la phase PRO (phase dite « projet ») et au début des travaux, il n'est quasiment plus possible de faire évoluer les choix des phases précédentes (voir Figure 1.10 ; n'oublions pas que l'information continue de varier après la réalisation de l'ouvrage et que des modifications ont lieu tout au long du cycle de vie de l'infrastructure : les courbes de cette figure pourraient être prolongées après la phase de réalisation).

Ce paradoxe impose de parfaitement maîtriser l'information qui est manipulée tout au long du projet, mais surtout le plus en amont possible, alors que comme le soulignait déjà à l'époque Gobin [2001], notre industrie souffre d'un manque d'anticipation. Pour palier cela, plusieurs solutions existent. Le travail collaboratif (ou ingénierie simultanée) et le travail en plateau étaient au départ des solutions. Cela faisait suite au travail coopératif où chacun est responsable de sa conception uniquement et les risques sont pris individuellement [Mattessich *et al.*, 2001]. Par contre, pour travailler de manière collaborative, le simple fait de communiquer et d'échanger sur un même projet n'est pas suffisant. Le passage de coopération à collaboration nécessite des outils informatiques plus performants et spécifiques [Kvan, 2000]. Le secteur de la construction cherche depuis plusieurs années à passer à l'ingénierie concurrente. Des travaux de fond étaient déjà réalisés dans les années 90 et 2000 dans cette optique [Jouini et Midler, 1996 ; Gobin, 2001]. Il s'agit d'une mise en commun des différents points de vue avec une prise en compte de l'impact des choix sur les autres acteurs [Gobin, 2001]. Donnons quelques éléments de définition de ce qu'est l'ingénierie concurrente pour l'industrie de la construction.

D'après l'ISO 19101⁵, il s'agit de la « Capacité d'un système ou d'une composante d'un système à permettre un partage des informations ainsi qu'un contrôle des processus coopératifs ». De manière générale, l'ingénierie concurrente se veut être une réponse pour surmonter les corporatismes et intro-

4. Ce paradoxe n'est pas spécifique au milieu de la construction : il existe de manière générale dans tous types de projet comme évoqué dans [Project Management Institute, 2008]

5. ISO 19101 : Information géographique - Modèle de référence.

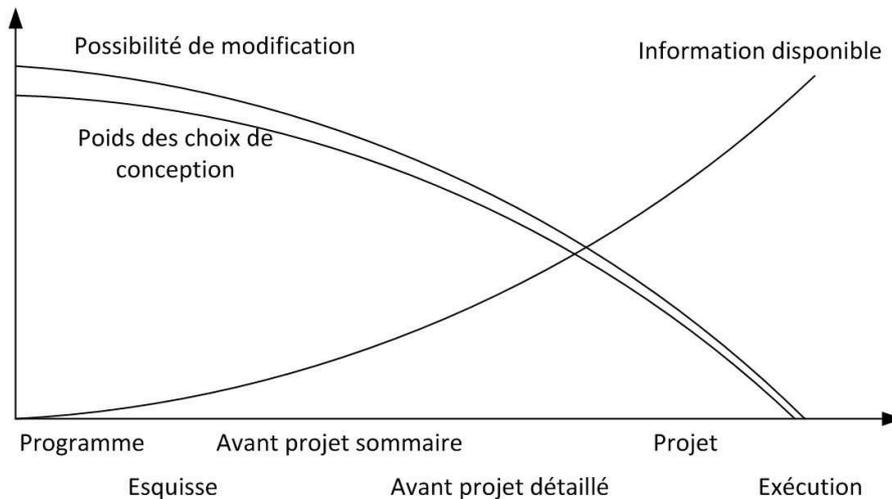


FIG. 1.10 – Illustration du paradoxe du processus de conception adapté de [Adolphe, 1991] et [Diab, 2000].

duire un dialogue constructif entre tous les intervenants au service de l'utilisateur final [Gobin, 2001]. L'expérience montre qu'il ne suffit pas de mobiliser des spécialistes mais qu'il faut de plus établir entre eux une chaîne de valeur. Et cela suppose un réexamen de leur comportement [Gobin, 2001]. D'où l'importance de considérer simultanément la structuration de l'information et les processus qui mènent à sa production. Pour Dartigues [2001], le point clé de l'ingénierie concourante est la capitalisation d'informations et la capacité de les réutiliser. L'ingénierie concourante consiste à concevoir de façon systématique, intégrée et simultanée, les produits et les processus qui leur sont rattachés. Cette méthode conduit [...] à considérer tous les éléments du cycle de vie du projet, de la conception à la mise à disposition des usagers, y compris la qualité, les coûts, la programmation et la satisfaction des besoins et requêtes des usagers [Jouini et Midler, 1996 ; Dartigues, 2001]. De ce fait, il devient indispensable de structurer l'ensemble des données manipulées par chaque domaine métier suivant une logique identique pour tous, ce qui en permettra alors le transfert continu de l'un à l'autre [Gobin, 2001]. Se pose ainsi la remise en question traitée par Dartigues [2001] de l'utilisation d'un seul modèle de gestion de l'information ou de plusieurs modèles avec des règles de cohérences. Nous reviendrons sur ce point plus bas. Passons maintenant au concept très actuel dans lequel se cristallisent les éléments ci-dessus.

1.2.2 Pratiques du BIM

Ces dernières années, dans le secteur de la construction, un acronyme ne cesse d'être employé : il s'agit du « BIM ». Pour de nombreuses raisons que nous verrons par la suite, cet acronyme signifie pour nous *Building Information Modeling*, une mauvaise traduction très répandue étant de remplacer *Modeling* par *Model* comme on le remarque par exemple dans [Volk et al., 2014]. Le Building Information Model fait référence uniquement à la modélisation d'un projet (maquette numérique 3D), ce qui est réducteur. Nous allons voir plus tard que cette vision restreinte n'est pas conciliable avec les changements actuels des actes de concevoir et de construire. Un autre acronyme est parfois proposé pour décrire ce monde de la ville, situé entre l'échelle du bâtiment et l'échelle du territoire : le CIM pour *City Information Modeling* (ou *Model*) [Gil et al., 2011 ; Ferriès et Bonhomme, 2014]. Le problème de cet acronyme est qu'il est également utilisé pour *Construction Information Management*, définition que nous partageons. Nous conservons donc l'acronyme BIM qui reste pertinent puisque la traduction de *building* signifie bien construction au sens large et non uniquement *bâtiment*.

Loin d'être une approche récente, le BIM dans sa substance et ses principes, est arrivé dans le

bâtiment dès 1985 d'après les organismes que nous détaillons plus bas comme Mediaconstruct au niveau français ou buildingSMART au niveau international. Il est même évoqué en 1970 pour les débuts de la modélisation 3D [Volk *et al.*, 2014] et vers 1980 pour les premiers modèles de bâtiment [Howard et Bjork, 2008]. Plusieurs projets industriels ou de recherche ont œuvré à ce qui aujourd'hui constitue le champs de recherche du BIM : notons notamment [Groupe Structuration de Données, 1991 ; Morand, 1994 ; Jouini et Midler, 1996]. Nous sommes passés, depuis 20 ans, de la manipulation de plans à la gestion de fichiers informatiques. Nous entrons actuellement dans l'ère [...] de la gestion des données techniques [Communic L1, 2010]. Le BIM actuel est l'aboutissement de tous ces travaux antérieurs.

Si l'on résume le BIM à la seule modélisation 3D, le secteur de la construction n'aurait pas aujourd'hui à faire face aux mutations qui lui incombent et qui modifient son organisation. Au delà des problématiques de structuration de l'information, la partie processus des projets de conception est également concernée par ces changements. Comme évoqué dans la section précédente (1.2.1), il était déjà question des processus de management de projet dans la construction dans les années 90 [Jouini et Midler, 1996]. Toutefois, encore aujourd'hui, de nombreux acteurs du secteur n'intègrent pas suffisamment cette problématique dans leur mise en place du BIM qui se résume à une « simple » sélection d'outils et de formats d'échange. Le contexte industriel actuel est changeant. Les produits et les processus sont de plus en plus complexes et ainsi, la gestion de gros volumes de données indispensable. D'après Dartigues [2001], cette complexité vient :

- des fortes contraintes imposées par les clients concernant les coûts, les délais ou la qualité des produits ;
- de la grande quantité de connaissances qu'il est nécessaire d'avoir et qui sont désormais multidisciplinaires ;
- du besoins de résolution coopérative de problèmes ;
- du raccourcissement du cycle conception et construction [environ 25 % d'après plusieurs experts du domaine de la construction] ;
- de la modification des objectifs liés à la durabilité : on ne construit plus pour construire mais pour exploiter.

Ce constat s'applique parfaitement au secteur de la construction. Dans ce contexte changeant, l'industrie du BTP n'est pas restée passive face à la généralisation du numérique. Cependant, le domaine des infrastructures n'a pas progressé à la même cadence que celui du bâtiment, en raison de ses spécificités. Celles-ci sont autant d'ordre technique que structurel : organisation du secteur et des marchés, jeux d'acteurs, etc. Détaillons également :

- la durée de vie très longue des ouvrages (plusieurs dizaines voire centaines d'années) qui nécessite la conservation de l'information et de la connaissance de sa structuration, par rapport à la durée de vie des formats de conservation des données numériques plus courte ;
- la multiplicité de leur utilisation possible sur tout leur cycle de vie et donc les durées de vie très variables selon les ouvrages (différences fortes entre un bâtiment, une infrastructure et une ville), ce qui s'ajoute au point précédent ;
- des phases de durée très différentes qui impliquent des hétérogénéité de l'information et des transformations (donc pertes) à chaque changement de phase ;
- le faible niveau d'industrialisation de leurs composants (bien qu'elle soit toujours croissante) ;
- des acteurs nombreux et différents suivant les phases qui contribuent à cette inhomogénéités de l'information ;
- des problèmes de cohérence de l'information dus aux besoins récents de concevoir de manière plus intégrée.

Fort heureusement, le secteur des infrastructures progresse comme nous allons le voir plus bas.

Les avantages de la mise en place du BIM

Bien que le BIM ne soit pas un objectif en tant que tel, les bénéfices évoqués pour justifier sa mise en place sont nombreux et apparaissent à plusieurs niveaux. Nous ne citons ici que quelques exemples tant la littérature sur ce sujet est vaste. Une majorité de ces travaux évoque des gains en délais et coût, une meilleure qualité de réalisation [Burcin et Rice, 2010 ; Azhar, 2011 ; Plume et Mitchell, 2011 ; Leite et al., 2011]. Fait assez rare pour être relevé, Plume et Mitchell évoquent également ces avantages pour les projets d'infrastructure, la majorité des travaux traitant uniquement les projets de bâtiment. D'autres travaux justifient les « investissements »⁶ de mise en place du BIM (processus et outils plus performants) comme amélioration du travail collaboratif [WcGraw Hill Construction, 2012 ; Fox et al., 2013]. Fox et al. rapportent des données opérationnelles qui montrent que plus l'engagement dans le BIM est important, plus le retour sur investissement est élevé. D'autres travaux décrivent des avantages plus opérationnels mais qui justifient pleinement les besoins de structuration de l'information et la mise en place de processus dédiés au suivi de la qualité et de la validité de l'information. Citons notamment les travaux de Eastman et al. qui évoquent la possible validation de la conception sur des modèles avant la construction.

Un autre avantage du BIM, systématiquement évoqué car très concret, est la possibilité de créer une Maquette Numérique (MN) du projet. Avant tout, distinguons la maquette 3D, simple représentation visuelle du projet, de la maquette numérique, constituée d'un ensemble de modèles portant de l'information géométrique et sémantique. Elle est définie comme « l'ensemble des fonctionnalités qui vont permettre aux métiers de travailler ensemble sur le projet » : elle permet les fonctions de gestion de l'information et de synthèse [Communic L2, 2010]. C'est donc le support du travail collaboratif. Elle permet ainsi la cohérence des données, la coordination des disciplines, le phasage de construction et la communication au sein du projet et avec l'extérieur. Cette vision de la MN est plus large que la vision classique : elle intègre la gestion des données et les processus de sa production et de son suivi qualité. Toutefois, les problématiques évoquées dans cette première partie empêchent une mise en place opérationnelle d'une telle maquette numérique. Nous allons voir au fil des chapitres comment notre proposition apporte des solutions pour une meilleure mise en place de cette maquette numérique de projet.

Le BIM pour les infrastructures : spécificités par rapport au BIM pour le bâtiment

L'objet de cette section n'est pas de déterminer si les projets d'infrastructures sont plus complexes que ceux de bâtiments, ce qui n'apporterait rien à notre recherche. Les difficultés sont différentes. Nous cherchons seulement à dégager certaines spécificités des projets d'infrastructures, spécificités à considérer dans notre réflexion. Ces dernières justifient l'impossible applicabilité du BIM développé pour le bâtiment sur les projets d'infrastructures.

La conception d'infrastructures, contrairement aux projets de bâtiments, répond à des spécificités relevées dans les livrables du projet Communic (projet décrit ci-dessous en section 1.2.3) [Communic L1, 2010] comme :

- influence majeure de l'existant et notamment le terrain naturel, la géotechnique, l'ensemble parcellaire ;
- longueur des projets qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres [avec un allotissement spatiale et pas uniquement par corps d'état] ;
- structure du secteur des travaux publics et ses très nombreux acteurs ;
- importance de l'intégration environnementale ;

6. La question du sur-coût lié à la mise en place du BIM est sensible. Plusieurs points de vue existent. Nous ne rentrons pas ici dans ces considérations.

- nécessité de concertation avec les propriétaires, les riverains et les associations.

Dans [Communic L1, 2010], des spécificités concernant les objets de les projets d'infrastructures sont relevées et reprises ci-dessous.

- Des objets multi-échelles : la gestion des échelles fait partie des contraintes de la conception et n'est pas uniquement un outil.
- Les produits construits sont uniques et mis en œuvre dans l'environnement unique de chaque projet.
- Excepté les quelques objets pré-fabriqués, les objets d'un projet d'infrastructures sont construits sur site : le produit est donc son propre atelier de fabrication et d'exploitation.
- L'acte de construire, en tout cas pour les infrastructures, reste majoritairement de la construction avec des matériaux changeants (foisonnement des terres, tassements, durcissement des bétons ou enrobés, etc.) et non pas de l'assemblage industriel. [Ces propos sont à nuancer par exemple dans le cas de l'installation des systèmes d'exploitation et de surveillance.]
- La construction ayant lieu en extérieur, cette phase est fortement influencée par l'environnement naturel et la météorologie locale. La question des incertitudes est à considérer comme une particularité des projets d'infrastructures à gérer avec attention.

Ces spécificités engendrent des relations particulières entre une infrastructure et la ville qui l'intègre. Elles sont différentes des relations entre un bâtiment et la ville. Ainsi, il est impossible d'exploiter directement les outils conceptuels pour les projets de bâtiment dans les projets d'infrastructure.

Du fait du contexte des projets de bâtiments, le BIM n'est pas envisagé de la même manière que pour les projets d'infrastructures. Eastman *et al.* [2011] déclarent que le BIM est porteur de la notion de modélisation collaborative orientée objet qui permet de caractériser les données relatives au projet de bâtiment à partir d'un ensemble d'informations multi-dimensionnelles (nD) décrivant les ouvrages, les structures, les équipements, les réseaux, mais aussi les usages, la planification de chantier ou les coûts de construction. Il n'est ici absolument pas question de l'environnement du bâtiment, du contexte dans lequel il s'inscrit. Or, Diab [2000] a montré que la considération de l'environnement d'un bâtiment, même à l'échelle du territoire est indispensable pour au minimum évaluer son impact environnemental. Nous avons également montré plus haut la nécessité de considérer l'environnement d'une infrastructure qui s'inscrit dans un ensemble dense composé d'objets et de systèmes, d'autant plus en zone urbaine. La vision BIM du bâtiment doit donc également évoluer et tendre vers celle que nous développons pour les projets d'infrastructures, qui peuvent inclure des projets de bâtiment. Ensuite, contrairement au secteur du bâtiment, une description détaillée d'un processus BIM pour les infrastructures n'existe pas actuellement [Obergrüsser et Borrmann, 2012] (il semble que ce soit toujours le cas à notre connaissance en 2016, en dehors des spécifications ou guides internes aux entreprises). Cette différence viendrait du fait que la définition des objets pour le bâtiment est plus « simple » en ce qui concerne par exemple « l'identification des objets et la délimitation de leur géométrie » [Obergrüsser et Borrmann, 2012]. En effet, beaucoup d'objets dans les infrastructures ont des limites plus floues ou ne peuvent être définis de manière générique comme une porte, un mur ou une fenêtre. Prenons l'exemple d'un talus qui n'a pas de réelle limite physique et qui peut appartenir simultanément à plusieurs ouvrages : ouvrage d'art, remblai et structure de chaussée. Ensuite, la diversité des échelles et des éléments qui constituent une infrastructure implique pour sa modélisation la prise en compte des multiples systèmes de coordonnées. Un objet peut être inscrit dans plusieurs systèmes de repérage différents tels que :

1. une géo-localisation dans un système de type Lambert, en X,Y,Z (repère absolu),
2. un repère orthonormé relatif propre à l'ouvrage lui-même (repère relatif),
3. un repérage kilométrique le long de l'ouvrage PT (profils en travers) ou PK (points kilométriques) : c'est un repérage relatif spécifique aux infrastructures linéaires même si aujourd'hui aucun outil de synthèse des données de conception n'est capable de travailler avec ce type de repère.

La question des moyens de se repérer dans l'espace n'est pas anodine. Elle participe au questionnement sur la multi-représentation spatiale de l'espace et aux différents points de vue des acteurs d'un projet. Par ailleurs, pour un même objet et selon le domaine de spécialité, plusieurs types de précision vont être utilisés. Pour illustrer ce propos, nous citerons deux exemples :

- la géométrie d'une infrastructure se définit dans des grandeurs de l'ordre hecto-kilométrique, avec une précision au dixième de millimètre ;
- un équipement d'exploitation est défini dans un repère de type PK, implanté en coordonnées réelles, construit avec les tolérances du génie civil (au demi cm près) et réceptionné avec des ajustements bien souvent inférieurs au millimètre.

Pour les infrastructures et plus généralement pour la ville, les problématiques des systèmes de coordonnées et de précision sont loin d'être négligeables. En effet, ces constats nous renvoient à la problématique de la section précédente (section 1.1) sur la relation entre l'échelle, la précision, le détail et la représentation.

Ces problématiques ne sont pas récentes mais toujours d'actualité comme l'illustrent le projet ANR Communic (2007 à 2010) et le projet national MINnD (2014 à 2018). Après avoir décrit les objectifs de ces deux projets dédiés au BIM pour les infrastructures, nous présentons ci-dessous les acteurs et institutions qui œuvrent au développement du BIM au niveau national et international.

1.2.3 Les principaux projets et acteurs autour du BIM

Cette section présente les principaux acteurs au niveau national ou international travaillant au développement du BIM non propriétaire, c'est-à-dire basé sur l'utilisation de standards ouverts. Le développement du BIM étant depuis plusieurs années en forte progression, il était indispensable d'en identifier les acteurs influents. Nous avons l'ambition d'apporter une proposition décrite dans la suite de ce mémoire de thèse en toute cohérence avec l'existant.

Le projet ANR Communic

Le projet de recherche Communic concerne les infrastructures. Il a été soutenu par l'ANR, labellisé par le pôle de compétitivité Advancity et s'est déroulé de 2007 à 2010. Il soutenait l'ambition d'agir sur les organisations et les technologies pour favoriser le travail collaboratif entre les acteurs directs des projets, l'évaluation des performances et des impacts environnementaux, économiques et sociétaux et la communication avec les acteurs influents⁷. Le projet était porté par plusieurs membres : ingénierie (Egis, Setec TPI), entrepreneurs (Bouygues TP, Eiffage TP, Vinci Construction France), acteurs universitaires et établissements publics de recherche (CSTB, CRG de l'école Polytechnique, LCPC, Université Paris Est).

Parmi les conclusions de ce projet qui ont influencé notre recherche, il apparaît nécessaire d'évoquer le concept proposé d'*Environnement Maquette Numérique*. Par ce concept, il s'agit d'organiser les échanges. Il est constitué des métiers de conception, des fonctionnalités de maquette numérique (gestion des informations de conception et synthèse) et d'une passerelle qui lie ces deux éléments par des formats d'échange (voir Figure 1.11). Ces éléments rassemblent le modèle de l'infrastructure et l'environnement qui l'influence (environnement métier et environnement contractuel). Il s'agit d'un résultat structurant qui est détaillé dans un des trois livrables du projet [Communic L1, 2010]. Les besoins sur lesquels nous basons notre réflexion faisaient partie des principaux résultats du projet. Citons notamment la nécessité d'un modèle de données commun, de format neutre d'échange, la définition des processus d'ingénierie concourante et la gestion d'une maquette numérique avec une structuration des objets 3D. Le projet s'est poursuivi par la création d'un « Club COMMUNIC ». Ce dernier a ensuite donné naissance à l'actuel projet MINnD qui mobilise maintenant l'ensemble de la profession.

7. <http://www.minnd.fr/le-projet-anr-communic/>

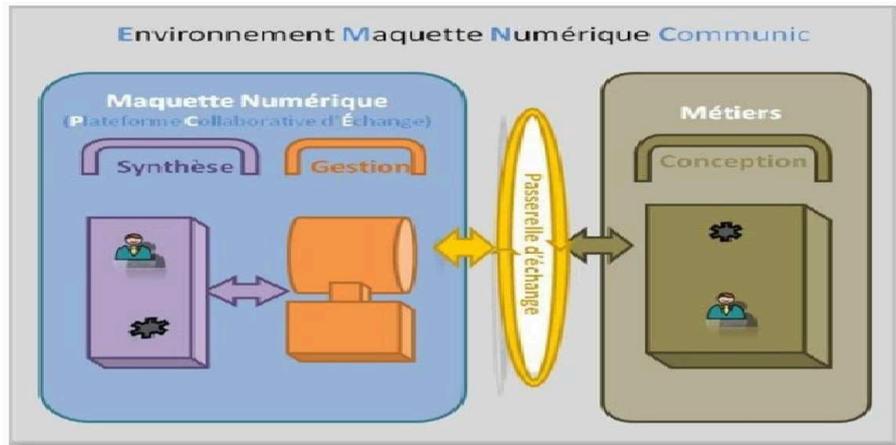


FIG. 1.11 – Schéma simplifié d'architecture des fonctionnalités de l'environnement de la maquette numérique [Communic L1, 2010].

Le projet national MINnD

Le projet national MINnD (Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables [MINnD, 2014]) s'inscrit dans la continuité du projet ANR Communic. Dans le contexte actuel d'évolution du secteur de la construction, le projet MINnD est lié à plusieurs enjeux :

- conserver une compétitivité internationale des constructeurs et ingénieries français ;
- s'inscrire dans une démarche de développement durable pour nos projets ;
- maîtriser et partager l'information en se basant sur des structurations de l'information, des standards, des dictionnaires et des outils, préalable aux enjeux précédents.

Sans rentrer dans le détail de la structuration de ce projet de recherche, évoquons simplement ses objectifs issus de [MINnD, 2014]

1. fédérer l'ensemble des acteurs concernés par les projets de BTP ;
2. faire évoluer les cultures et les mentalités vers un travail plus collaboratif ;
3. structurer les informations à échanger ;
4. définir les besoins d'outils logiciels à développer ;
5. promouvoir les formations nécessaires.

Ce projet est structuré au travers de quatre thèmes de recherche :

1. mise en perspective des pratiques : Outils, Technologies et Processus ;
2. expérimentations au sein de cas d'usage réels [nous exploitons ce principe de cas d'usage pour l'application de notre proposition de modèle conceptuel dans la quatrième partie de ce mémoire] ;
3. structuration des informations ;
4. propositions d'adaptation des règlements.

Voir le rapport du programme de recherche de MINnD [MINnD, 2014] et le site internet <http://www.minnd.fr/> pour un complément d'information. La seconde tranche de MINnD est actuellement en démarrage. Ainsi, certaines modifications mineures dans l'organisation des thèmes sont actuellement en cours (début 2016).

Les trois piliers du BIM développés par buildingSMART International

BuildingSMART⁸ a démarré en 1994 sous le nom de IAI (International Alliance for Interoperability). Ce consortium est aujourd'hui présent dans 24 pays au travers de ses *Chapitres* locaux (Médiacons-

8. <http://www.buildingsmart-tech.org/> ; dernière consultation le 26/06/2016.

truct en France⁹, avec près de 500 membres, tous professionnels du secteur de la construction). Sa mission fondamentale est de « soutenir une amélioration qualitative, économique et environnementale de l'industrie de la construction via un meilleur partage de l'information, basé sur des normes internationales ouvertes » [Mediaconstruct, 2016]. BuildingSMART a notamment soutenu le développement des IFC (Industry Foundation Classes)¹⁰ que nous détaillons dans l'Annexe A [BuildingSMART, 2016]. Sans entrer dans le détail de son organisation, évoquons tout de même la *Product room* qui œuvre au développement du buildingSMART Data Dictionary (bSDD)¹¹ et l'*Infra room* qui rassemble tous les projets de développement liés aux infrastructures [Mediaconstruct, 2016]. Elle a identifié plusieurs champs ayant besoin de standardisation pour structurer la profession comme les modèles de données pour les routes, les ponts ou les tunnels [BuildingSMART, 2016].

En complément du développement des IFC et du bSDD que nous venons d'évoquer, buildingSMART travail à la définition des Information Delivery Manual (IDM¹²) et des Model View Definition (MVD¹³) ainsi qu'à la cohérence de ces concepts qui constituent un socle solide pour la mise en place du BIM : IFC, IFD et IDM (la définition des MVD est possible uniquement une fois les IDM définis) (voir Figure 1.12). Les problématiques que nous traitons dans notre recherche concernent principalement ces deux derniers éléments : la définition des IDM et des MVD. Toutefois, puisque le BIM fonctionne avec tous ces éléments, nous étudions également les IFC et la cohérence sémantique nécessaire au fonctionnement du bSDD au travers des ontologies, sujet que nous traitons à la fin de cette partie.

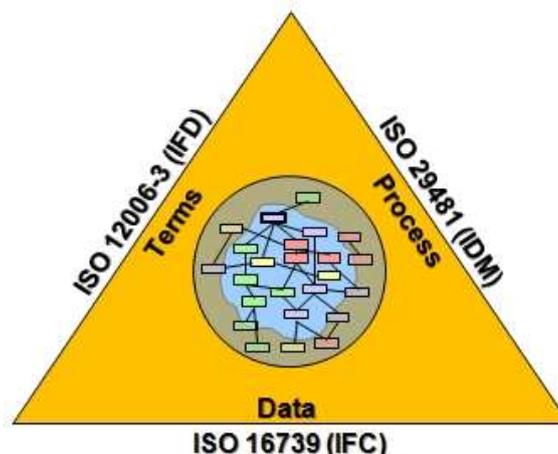


FIG. 1.12 – Les piliers du BIM normalisé et ouvert (non propriétaire) : triptique <http://www.buildingsmart-tech.org/>, consulté le 07/03/16.

9. Les membres de buildingSMART sont regroupés dans 13 chapitres, définis en fonction de leur langue ou de leur proximité géographique : Mediaconstruct est le chapitre français. Créée en 1989, cette association a pour but d'accompagner la diffusion et l'appropriation des nouvelles technologies de l'information et de la communication pour la filière Bâtiment. Depuis le milieu des années 90, cette association a pour fer de lance l'interopérabilité des logiciels dans le cadre de la maquette numérique dite « libre », également appelée OpenBIM [Mediaconstruct, 2016] et maintenant OpenINFRA pour les projets d'infrastructures.

10. Les IFC (Industry Foundation Class) répondent au problème d'interopérabilité soulevé par l'IAI en proposant un format standard d'échanges pour les métiers de la construction. Ils représentent ainsi une alternative stable, pérenne et normalisée aux formats propriétaires des logiciels commerciaux actuels [Arthaud, 2007].

11. bSDD est une bibliothèque de référence basé sur la norme ISO 12006 - 3 IFD (International Framework for Dictionaries) et destinée à soutenir l'amélioration de l'interopérabilité dans l'industrie du bâtiment et de la construction. Le BSDD fournit une méthode flexible et robuste de relier les bases de données existantes avec des informations de construction à un modèle d'information du bâtiment axé buildingSMART (BIM) <http://www.buildingsmart.org/standards/technical-vision/open-standards-101/>. L'ISO 12006 - 3 est une norme de terminologies pour les bibliothèques d'objets et les ontologies pour le BIM : les IFD permettent l'interopérabilité sémantique du BIM [Volk et al., 2014].

12. Un IDM décrit les données à échanger entre plusieurs acteurs pour une tâche ou une analyse spécifique ; des détails sont donnés plus tard en section 2.2.1.

13. Un MVD décrit le contenu d'un échange de données dans un scénario spécifique avec des contraintes particulières [Chipman et al., 2012] : un MVD est la transcription pour les outils informatique des IDM.

Les organismes de standardisation

Il existe plusieurs organismes officiels de normalisation qui agissent à des niveaux de décision différents. Citons les principaux qui sont :

- l'AFNOR (Association Française de Normalisation) au niveau national,
- le CEN (Comité Européen de Normalisation) au niveau européen,
- l'ISO (International Organization for Standardization) au niveau international.

Rentrer dans le détail du fonctionnement de ces organisations ou dans la hiérarchisation des standards n'a pour notre travail pas de réel intérêt. Par contre, plusieurs points sont à retenir sur ces organismes de normalisation puisqu'ils standardisent le contexte dans lequel l'ensemble de la profession de la construction progresse : c'est en ce sens qu'il est indispensable d'évoquer ici le sujet de la normalisation.

Notre participation à différents groupes de travail en normalisation nous a montré que la standardisation reste un processus long par rapport à la demande du secteur de la construction en pleine explosion. Les normes existantes ne sont pas suffisantes comme nous l'évoquerons par exemple à propos des IDM que nous venons d'évoquer (norme ISO 29481). Toutefois, la standardisation est indispensable à l'ingénierie concourante dans tous les secteurs [Dartigues, 2001 ; Eastman *et al.*, 2011 ; Devys et Gesquière, 2012]. Dans le cadre du projet Communic, des acteurs d'autres industries comme l'automobile, l'aviation ou l'aérospatial ont été consultés sur leurs pratiques d'échange et de structuration de l'information dans leurs projets. Citons une conclusion intéressante : au delà des besoins de normalisation des formats utilisés et de la standardisation des outils ou des plateformes d'échange, il s'avère indispensable de normaliser également les processus ou méthodologie de travail. Sur ce sujet nous pouvons citer la norme ISO 15926 « Life Cycle Data for Process Plant » largement utilisée [Leal, 2005]. Ces conclusions sont toutefois à adapter au secteur de la construction. Ce dernier travaille avec une structuration du marché, des entreprises et des projets bien différente et surtout changeante au fil des projets. Les budgets sont plus faibles et les délais plus courts comme évoqué dans [Castaing et Tolmer, 2015], la hiérarchie des acteurs est moins prononcée et parfois réversible entre donneur d'ordre et exécutant et les projet n'aboutissent qu'à des ouvrages uniques et non à des séries.

L'Open Geospatial Consortium (OGC)

L'Open Geospatial Consortium (OGC)¹⁴ est un consortium industriel international entre des entreprises, des organismes gouvernementaux et des universités, participant à un processus pour élaborer des normes d'interface disponibles au public. L'OGC est organisé en plusieurs secteurs opérationnels :

- l'*OGC Standards Program* avec le Comité technique et le comité de Planification de l'OGC qui travaillent dans un processus de consensus pour créer et réviser les standards de l'OpenGIS précédemment adoptés par les membres de l'OGC,
- l'*OGC Interoperability Program*, qui est une série d'initiatives d'ingénierie destinées à accélérer le développement et l'acceptation des normes OGC et afin que celles-ci répondent à l'environnement et aux besoins des usagers.

Les procédures guident le travail des programmes de l'OGC. Celles-ci assurent la transparence du processus de l'OGC, décrivant la façon dont les demandes de modifications, les opinions divergentes doivent être réglées, de sorte que les questions techniquement légitimes soient traitées de manière équitable, sans parti pris et en temps voulu. Les procédures OGC ont également standardisé les mécanismes de contrôle de qualité pour assurer la pertinence des normes par rapport à leurs buts avancés. (Informations extraites de [Open Geospatial Consortium, 2011]).

L'OGC vient donc en complément de l'organisation internationale officielle de normalisation (ISO), l'organisme de normalisation le plus important dans le domaine des technologies de l'information géospatiale [Lowner *et al.*, 2013]. L'hétérogénéité actuelle des modèles de données géospatiaux en terme

14. <http://www.opengeospatial.org/> ; dernière consultation le 26/06/2016.

de géométrie et de topologie montre l'importance de standards pour les bases de données géospatiales [Breunig et Zlatanova, 2011]. De plus, il semble qu'un des objectifs de la création de l'OGC était de palier la lenteur de la normalisation *de jure* comme l'écrivent Billen *et al.* [2008]. Le génie urbain ainsi que les projets d'infrastructures étant des consommateurs de données géospatiales, il était nécessaire de nous intéresser également aux différentes normes supportées par l'OGC. Nous étudierons d'ailleurs plus bas le standard d'échange CityGML.

1.2.4 Le changement de paradigme en cours pour les projets de conception

La section 1.1 décrit plusieurs problématiques liées à certains concepts de structuration et de représentation de l'information pour les projets d'infrastructures. A ces problématiques, il faut ajouter celles dues au changement de paradigme en cours dans tous les métiers de la conception. Certaines sont récurrentes et existent depuis de nombreuses années comme la faible interopérabilité entre outils métiers. D'autres sont plus récentes. Elles résultent des mutations du marché, concomitantes à l'apparition de nouvelles performances des outils métiers. La vision portée sur l'information évolue. Contrairement aux années 80, la donnée devient aujourd'hui un capital. La création de l'information n'a plus comme seule finalité le calcul du coût ou la production de livrables. Sa qualité sur tout le cycle de vie d'un ouvrage devient un critère à considérer. En effet, les grands groupes s'intéressent à la gestion de la matière d'œuvre de l'ingénierie (les données techniques) et s'orientent vers une meilleure maîtrise du patrimoine informationnel qu'elle représente [Eynard, 2005]. Sa qualité et son partage font la réussite des projets de conception. D'autres industries travaillent également dans ce sens depuis de nombreuses années comme évoqué dans le projet ANR Communic [Communic L1, 2010] (visites chez les industriels suivants : AKER, AIRBUS, DASSAULT, DCNS et PSA). Dans cet environnement complexe et hétérogène [de l'ingénierie de la conception], un enjeu majeur consiste à faire communiquer l'ensemble des outils de façon à ce qu'ils fournissent une vue commune et cohérente du produit [Nguyen, 2006]. Cela conduit, entre autres avantages, à faciliter les échanges entre partenaires et à fournir un accès commun et unifié aux données techniques [Guyot, 2007]. L'amélioration de la communication entre les outils d'ingénierie aborde deux questions importantes qui sont : la satisfaction des besoins croissants d'interopérabilité entre les outils et autour d'un référentiel, et l'évolution des standards et formats d'échange de données [Assouoko *et al.*, 2009]. Nous traitons ce sujet dans la section 2.1 ci-dessous.

Comme expliqué dans l'ouvrage collectif de Bot et Vitali [2011], le monde de la conception est actuellement dans un changement de paradigme. Il est la conséquence d'avancées dans les techniques et la science d'un domaine qui s'est fait plutôt par un saut que dans une continuité. Le BIM n'est actuellement que la conséquence de ce changement de paradigme, facilité en partie par l'arrivée rapide de nouvelles technologies et d'outils plus performants (outils de conception mais également web de données, bases de données orientées graphes, ontologies, etc.). Ce contexte impose de mobiliser une connaissance holistique lorsque le concepteur associe, rapproche, combine, architecture, arrange, « synthétise » dans son activité de conception [Bot et Vitali, 2011]. Dans une partie de cet ouvrage, Micaelli *et al.* [2011] évoquent trois paradigmes du domaine de la conception :

1. « conception artisanale »,
2. « conception empirique »,
3. « conception abstraite ».

L'humanité est passée par les deux premiers paradigmes et se situe actuellement dans le troisième. Les deux premiers paradigmes peuvent respectivement être décrits comme une conception artisanale, traditionnelle, basée sur un savoir-faire pratique et comme une conception plus expérimentale, avec déjà une distinction nette entre les lieux de fabrication et d'utilisation de l'objet conçu (appelé dans cet ouvrage *artefact*) et les lieux d'expérimentation et d'amélioration des prototypes de l'artefact. Il y a donc production d'essais en se basant au maximum sur des données avals du cycle de vie de

l'artefact (fabrication, fonctionnement, entretien) : comprendre et valider le mécanisme par sa modélisation abstraite se fait antérieurement à sa réalisation [Bot et Vitali, 2011]. Dans leur travail, Bot et Vitali établissent un tableau comparatif de ces trois paradigmes de la conception (voir Tableau B.1 en Annexe B). Sans le reprendre entièrement, évoquons les éléments clés qui concernent le paradigme de la conception abstraite, paradigme dans lequel le domaine de la construction se dirige actuellement (les auteurs évoquent le fait que l'ensemble de la conception au sens large, de toutes les industries s'oriente vers cette « conception abstraite » bien que personne ne soit actuellement en mesure de la définir précisément) :

- il est toujours question de modélisateur et de modèles (« concevoir c'est modéliser ») ;
- mise en avant de la coproduction, équipes pluridisciplinaires et circulation des modèles entre équipes en présence ou à distance ;
- répartition du travail par des processus codifiés et non de manière taylorienne comme pour la conception empirique ;
- utilisation de modèles génériques et prescriptifs abstraits à partir desquels seront générés des processus et artefacts concrets.

Dans ce paradigme de la *conception abstraite*, la conception repose sur un outil particulier qui n'est ni un banc d'essai, ni une maquette, ni un schéma mais bien un modèle générique, susceptible aussi bien de décrire l'artefact (ce que nous appellerons plus tard « le système à faire ») que son processus de conception (appelé plus bas « système pour faire »). Ce *modèle* au sens large est appelé « ingénierie système » [Bot et Vitali, 2011]. Comme nous allons le voir en section 4.1, l'ingénierie système n'est pas l'unique solution au nouveau paradigme de la conception. Certains auteurs comme Fiorèse et Meinadier ou Rochet la décrivent plus comme un outil de réflexion, comme une méthode de travail ouverte et non comme un modèle générique à dériver sur chaque projet. Elle est également évoquée comme « évolution scientifique nécessaire pour concevoir des écosystèmes urbains durables » [Rochet et Peignot, 2013]. Ces propos de Bot et Vitali sont donc à nuancer. C'est ainsi que nous introduisons l'ingénierie système dans notre travail, comme outil indispensable mais non suffisant.

Azhar [2011] décrit le BIM comme le nouveau paradigme du secteur de la construction. Cela reflète un avis largement répandu dans la profession de la construction. Les éléments préliminaires ci-dessus tendent à montrer que le BIM regroupe plutôt les conséquences du changement de paradigme pour les projets de conception comme l'explique C. Gobin avec son concept de « constructibilité ». Dans sa vision, le BIM n'est que le moyen final reposant sur un changement de paradigme : « la constructibilité, nouvelle approche pour arriver à créer un milieu urbain plus efficient¹⁵ ». Ce chapitre apporte des arguments à cette affirmation. Les nouveaux besoins en modélisation et en formalismes, la vision *système* d'un projet ainsi que la gestion des exigences sont la conséquence des nouveaux besoins liés au paradigme de la *conception abstraite*. C'est cet ensemble qui peut être appelé le BIM. Ce n'est donc pas le BIM qui nécessite la mise en place de modèles de données, des améliorations dans l'interopérabilité, etc., mais bien cet ensemble cohérent qui nécessite une pensée holistique de l'information de projet.

Dans cette continuité, nous avons étudié des méthodes et outils conceptuels d'autres industries susceptibles de répondre à nos problématiques d'interopérabilité et de définition des besoins en échange d'informations. Nous avons retenu principalement l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences (détaillées dans la seconde partie de ce mémoire). Mais l'utilisation de ces outils résulte d'une culture ancienne dans ces industries. Leur présence se noie entièrement dans la manière de concevoir. Il est donc nécessaire d'évaluer leur pertinence pour notre industrie ainsi que leur applicabilité sur nos projets. Ensuite, comment les adapter au fonctionnement de la profession, à l'organisation des acteurs qui est moins hiérarchisée et moins stable que dans l'aéronautique par exemple ? Toutes les visions sur l'amé-

15. Voir https://www.youtube.com/watch?v=QFpYKf30ze4&list=PLcns9K_E0E12UotZz-Uua1P4wavPa3N-K&index=3, dernier accès le 16/01/2016.

lioration de la qualité de l'information par le partage et la participation de chaque acteur d'un projet à cette qualité ne sont pas convergentes. La pratique a montré qu'il n'est pas si simple de tout partager, du fait des outils mais également des montages contractuels. Ainsi, comme cela peut être le cas dans d'autres industries, les formats doivent être normalisés mais également les échanges. **Ce nouveau paradigme de la conception abstraite se résume dans le fait que la manière de concevoir ainsi que les données qui ont accompagné cette activité font maintenant partie de la production.** La section 2.1 propose un état de l'art sur les standards d'échange et les éléments de normalisation des processus d'échange et identifie les manques.

1.2.5 Réglementation relative au BIM

Nous évoquons ci-dessous deux sujets de réglementation en lien avec le BIM. Il s'agit de :

- la loi MOP qui ne semble actuellement pas contradictoire avec la mise en place du BIM telle que nous l'envisageons,
- la directive européenne Inspire et plus spécifiquement sa partie sur la description des données relatives aux infrastructures et aux données environnementales.

Ces deux sujets apportent des contraintes dans la mise en place du BIM, réglementaires sur les processus et structurelles sur les données. Travaillant à la fois sur les processus et la structuration des données, il convient de s'intéresser à ces contraintes.

Le cadre contractuel : la loi MOP et les PPP

La loi du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée ainsi que ses textes d'application est dite « loi MOP ». Dans ce contexte, le maître d'œuvre conseille, réalise des études et dirige les travaux qu'un professionnel exécute pour le compte d'un client, le maître d'ouvrage. Au regard de la définition légale de ce cadre organisationnel, l'ingénierie concurrente est plus limitée dans le cadre de la loi MOP que dans les marchés publics globaux ou les partenariats public-privé (PPP). Les PPP permettent en effet un travail moins solitaire des acteurs du projet et les risques sont partagés (relativement aux contrats passés entre les parties). Toutefois, la collaboration des acteurs au sein de chaque phase peut être exigée contractuellement par le maître d'ouvrage dans le marché de maîtrise d'œuvre d'une part et dans le marché de travaux d'autre part.

La loi MOP expose les différentes missions qui peuvent être confiées à la maîtrise d'œuvre et impose, pour la construction d'un bâtiment, une « mission de base » qui couvre la conception dans son ensemble, le contrôle des travaux et leur réception. Pour les projets d'infrastructure, il n'existe pas de mission de base obligatoire, donc le maître d'ouvrage peut se charger du suivi des travaux. Le contenu des missions, soit « les éléments de mission », figure dans le décret d'application du 23 novembre 1993 et dans l'arrêté du 21 décembre 1993. La précision des textes réglementaires se justifie par la volonté de garantir la qualité dans la conception et la construction.

Aujourd'hui, plusieurs réflexions sont lancées sur la compatibilité des nouvelles pratiques collaboratives permises par les BIM avec cette réglementation. Notamment dans le cadre du Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB), un groupe de travail dirigé par la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP) établit un document qui fait état de ce travail de correspondance. D'autres études sont à mener dans ce sens.

La directive européenne Inspire

La directive 2007/2/CE du 14 mars 2007, dite *directive Inspire* pour Infrastructure d'information spatiale dans la Communauté européenne, est une initiative de la Commission européenne qui vise à la création d'une infrastructure européenne de données spatiales fournissant des données du secteur public d'une manière interopérable [Norme de CityGML \[2012\]](#) pour favoriser la protection de l'environnement.

Elle impose aux autorités publiques, d'une part de publier sur Internet leurs données environnementales géographiques, d'autre part de les partager entre elles. Elle vise particulièrement à décloisonner l'information entre les autorités publiques [Merrien et Leobet, 2011]. D'après Emgard et Zlatanova [2008], un ensemble de 21 thèmes de données spatiales a été défini (certains sont encore en cours de conception comme l'évoquent la Norme de CityGML [2012] et Merrien et Leobet [2011] qui ont eux recensé 34 thèmes en tout). Ils couvrent plusieurs types d'entités comme les bâtiments, les modèles de terrain et des réseaux de transport, l'utilisation des terres, la géologie ainsi que des éléments administratifs et environnementaux comme les parcelles cadastrales, les adresses, voir la santé et la sécurité. Ces modèles d'application sont d'après la Norme de CityGML appelés à devenir une exigence légale pour les fournisseurs de données du secteur public en Europe. Le modèle de CityGML a fortement influencé cette directive pour sa partie sur le modèle de description des bâtiments [Norme de CityGML, 2012 ; INSPIRE Thematic Working Group Buildings, 2013]. D'après Merrien et Leobet [2011], les autorités concernées par cette directive sont l'État, les collectivités territoriales, les établissements publics, les personnes chargées d'une mission de service public en rapport avec l'environnement, dans la mesure où ces informations concernent l'exercice de cette mission. Pour l'essentiel les communes ne sont concernées que pour leur document d'urbanisme : PLU (plan local d'urbanisme), POS (anciens plans d'occupation des sols) ou carte communale. Seules sont concernées les données disponibles sous format électronique ou qui seraient collectées à l'avenir. La directive n'impose pas la collecte de nouvelles données géographiques. Elle n'exige pas non plus de numériser des données existantes qui ne le seraient pas [Merrien et Leobet, 2011].

Cette directive propose donc un modèle de données à considérer pour les études d'impact environnemental. Les projets d'infrastructure sont donc directement concernés. Pour le travail de réponse aux exigences réglementaires, les projets d'infrastructure consomment de la donnée géographique décrivant l'existant, qui à terme sera structuré par le modèle de la directive Inspire (voir par exemple pour la description des réseaux de transports [INSPIRE Thematic Working Group Transport Networks, 2009]). Les enjeux de cette directive sont donc cohérents avec notre évaluation des besoins en structuration et en exploitation de l'information décrivant les infrastructures. Le lien entre le modèle conceptuel d'Inspire et de CityGML nous a conforté dans notre choix d'analyser ce dernier de manière détaillée.

Le BIM est aujourd'hui en pleine expansion, sous des formes plus ou moins évoluées. La maturité des acteurs, des entreprises, mais également du secteur d'activité de la construction engendre ces variations. Il est le résultat d'une progression des moyens de concevoir, des pratiques et des besoins du domaine de la construction. Ces dernières années, de nouvelles générations d'outils ont vu le jour. Les capacités de calcul des outils informatiques facilitent ces changements [Communic L1, 2010]. Nous avons donc à notre disposition de nouveaux outils conceptuels et informatiques ainsi qu'une nouvelle conception de la valeur que peuvent prendre les données avec le développement du *big data*, du *data mining*, de la création d'ontologies, etc. Et pourtant, les problématiques autour de la gestion de l'information sont nombreuses et de plus en plus complexes. Ces nouveaux outils et notre changement de vision sur la valeur de l'information sont simultanés à la vision que nous portons sur le milieu urbain dans lequel nous vivons. La considération de la ville par divers acteurs comme un ensemble de réseaux, comme un système complexe ou comme un métabolisme complexifient les questions de modélisation et d'utilisation de l'information descriptive du milieu urbain.

Une problématique de recherche entre la structuration de l'information et la structuration des processus

Résoudre un problème signifie simplement : le représenter de façon à rendre sa solution transparente (Amarel, 1966). Si la résolution de problèmes pouvait réellement être exprimée dans ces termes, le thème de la représentation deviendrait central. Même s'il n'en va pas ainsi, une compréhension plus approfondie de la façon dont nos représentations sont créées et dont elles contribuent à la résolution des problèmes devient une composante essentielle de la future théorie de la conception (Simon, 1982).

Ce chapitre évoque le suivi du projet d'autoroute urbaine nommé *Rocade L2* ou *A507* à Marseille ainsi que les premières implémentations du BIM dans les processus de conception. Ces éléments constituent un retour d'expérience conséquent qui a orienté certains choix dans la structuration de notre démarche de recherche. Nous évoquons également dans ce chapitre les problématiques de structuration de l'information, d'interopérabilité et de définition des échanges d'information. Nous verrons que les outils actuels ne sont pas suffisants. Le secteur de la construction a principalement besoin de méthodes et d'outils conceptuels pour la définition des échanges d'information. Le travail décrit dans ce chapitre évoque les principaux concepts considérés dans notre recherche.

2.1 Les besoins d'interopérabilité et de structuration de l'information

Comme l'a illustré et expliqué J. Stoter à la conférence CIB W78 (Eindhoven, Pays-Bas, 2015¹), l'industrie de la construction se trouve « à la convergence de deux mondes principaux [géomatique et secteur de la construction] avec leurs spécificités, qui nécessitent d'être conservées ». Nous avons évoqué plus haut les difficultés à intégrer les données mais également à travailler de manière collaborative avec les points de vue différents de ces deux domaines, par exemple sur la conceptualisation du « niveau de détail ». Un projet d'infrastructure regroupe des données de l'existant, liées par exemple au fonctionnement des réseaux en place, des données de l'existant relevées spécifiquement pour le projet (géotechniques, ouvrages ou bâtiments proches de l'emprise du projet, etc.) et des données provenant de la conception avec un niveau de détail sans commune mesure avec celui décrit dans un SIG [Ferrière et Légère, 2006] (voir pour rappel la Figure 1.4). Ces différences interviennent tant sur l'approche

1. Voir <http://cib-w78-2015.bwk.tue.nl/>, dernier accès le 16/01/2016

conceptuelle de structuration de l'information que sur la production et l'utilisation de cette information. En effet, du point de vue des données, leur structuration selon leur provenance est totalement différente comme l'explique [Arthaud \[2007\]](#) dans un contexte de modélisation d'ouvrages d'art. D'après [\[Plume et Mitchell, 2011\]](#), nous pouvons de manière générale écrire que le BIM impose de mettre en place une structure des données robuste du point de vue sémantique et géométrique. D'un autre côté, les SIG permettent un large éventail d'analyses spatiales. Le conflit le plus important à considérer est donc celui issu de l'utilisation simultanée de ces deux approches sémantiques de l'information. Bien qu'elles répondent chacune de manière satisfaisante aux besoins pour lesquels elles sont structurées, la nécessité de les concilier dans des modèles communs ou au moins cohérents se fait de plus en plus sentir [\[Ferriès et Légise, 2006 ; Plume et Mitchell, 2011 ; Gil et al., 2011 ; Ferriès et Bonhomme, 2014\]](#).

Dans son objectif de profiter à la fois de la puissance sémantique du BIM et de la puissance analytique des SIG, [Plume et Mitchell \[2011\]](#) identifient trois « technologies de modélisation de l'information » : les IFC (étendus pour les infrastructures et l'urbain), les standards de l'OGC dont le CityGML et les ontologies qui permettent d'aboutir à une description formelle explicite des concepts employés. Ces éléments seront détaillés plus tard mais cette affirmation explicite, pour les projets d'infrastructures, la nécessité de rendre cohérents le monde de la construction et le monde de l'analyse géospatiale. A cela il faut ajouter que la modélisation du sous-sol reste encore aujourd'hui un problème à résoudre [\[Kolbe et Groger, 2003\]](#) et que peu importe le standard, aucun format ouvert type IFC, CityGML, LandXML ou autre ne couvre la totalité des domaines à modéliser dans les projets d'infrastructure [\[Communic L1, 2010 ; Mignard, 2012\]](#). Nous devons donc travailler à concilier les différentes manières de modéliser (conceptuellement) un projet en lien avec les besoins en échange d'informations. Mais cette conciliation se heurte à plusieurs incohérences dans la manière de structurer l'information, de décrire les infrastructures ou de définir le niveau d'information à échanger. Nous avons travaillé sur ces verrous et proposons dans les parties 2 et 3 des éléments de réponse.

Pour [El-Mekawy et al. \[2012\]](#), le BIM s'est développé comme un champ de recherche ciblant principalement les problèmes d'intégration de l'information et d'interopérabilité pour l'industrie de la construction. Comme nous allons le voir tout au long de ce mémoire, il ne s'agit pas pour nous du problème le plus central dans la mise en place du BIM. Par contre c'est un obstacle incontournable pour une mise en œuvre opérationnelle du BIM. De nombreux travaux sur les coûts du manque d'interopérabilité existent : ils sont longuement évoqués dans [\[Gallaher et al., 2004\]](#) par exemple. Nous pouvons citer un rapport de l'OGC qui évoque plusieurs études mettant en évidence les bénéfices du développement de standards [\[Open Geospatial Consortium, 2011\]](#). Évoquons également un rapport opérationnel qui décrit la valeur de la donnée de conception pour l'exploitation du patrimoine [\[Sevanche et Bresson, 2014\]](#). [Borrmann et al. \[2012\]](#) ajoutent que l'utilisation de formats de données ouverts et neutres constitue l'approche la plus appropriée pour réaliser les échanges de données. De nombreux échanges d'informations sont perturbés par les seules différences de définition d'un même mot, objet ou concept. Ces malentendus sont accentués lors de projets à collaboration internationale par manque de modèle de structuration de l'information commun. Comme évoqué dans [\[Obergrösser et Borrmann, 2012\]](#), afin d'améliorer cette situation, BuildingSMART introduit dans le cadre international des dictionnaires (International Framework for Dictionaries, IFD maintenant appelés bsDD pour buildingSMART Data Dictionary) pour la définition des termes et des propriétés en lien avec les objets présents dans les IFC (voir pour rappel la Figure 1.12). D'autres projets d'élaboration de dictionnaires ou de mise en correspondance des termes de plusieurs dictionnaires sont en cours comme CB-NL aux Pays-Bas, bien qu'il ne soit pas possible de faire correspondre tous les termes de manière bijective. Au niveau français nous pouvons citer le projet de normalisation de propriétés PPBIM.

Nous venons d'évoquer certains travaux sur les coûts induits par le manque d'interopérabilité. Nous avons également montré que les infrastructures s'inscrivent dans un environnement vaste, décrit par

de nombreux acteurs à des échelles différentes, et donc avec des façons variables de modéliser et de gérer l'information. Par conséquent, un projet d'infrastructure se situe à la convergence de nombreux standards et organismes de standardisation aux intérêts parfois divergents. De plus, le temps de la standardisation est généralement plus lent que le temps des évolutions technologiques. Nous le voyons au travers de notre implication au niveau de l'AFNOR et du CEN puisque dans le domaine du BIM, certains groupes de normalisation sont récents alors que les besoins opérationnels se font pressants. Nous évoquons ci-dessous plusieurs éléments de normalisation en lien avec le BIM. Dans cette section, nous étudions principalement deux standards ouverts qui sont les IFC et le CityGML. L'utilisation de formats de données ouverts neutres a prouvé être l'approche la plus appropriée pour faciliter les échanges de données dans un contexte de travail collaboratif [Eastman *et al.*, 2011]. L'application de normes apporte également des solutions à des problèmes d'échange de données pour la conception [Devys et Gesquière, 2012]. L'interopérabilité entre la construction de modèles d'information (BIM avec les IFC) et les systèmes d'information géographique (SIG et CityGML²) est l'un des problèmes majeurs auxquels sont confrontés les systèmes d'information de construction et les praticiens d'aujourd'hui. Le but de cette intégration est de répondre à la demande accrue pour l'analyse de la construction, les applications de planification urbaine, la gestion des catastrophes, du cadastre et de la sécurité intérieure et d'autres applications [Benner *et al.*, 2005 ; Kolbe *et al.*, 2005]. Des modèles sémantiques solides pour supporter des requêtes et des analyses complexes sont requis pour les applications d'ingénierie et de planification telles qu'elles viennent d'être évoquées [Nagel *et al.*, 2009]. Enfin, nous souhaitons préciser que ces deux normes ouvertes qui définissent les formats d'échange IFC et CityGML respectent d'après une étude approfondie de [Mignard, 2012] tout ou partie des normes géographiques internationales et notamment celles de l'ISO/TC211 [ou de l'OGC puisque le CityGML est un standard soutenu par l'OGC].

2.1.1 Observations sur les deux principaux standards d'échange : IFC et le CityGML

Nous donnons ici quelques éléments concernant les IFC et le CityGML par rapport à notre contexte présenté dans la Figure 1.4. L'Annexe A apporte des éléments sur ces deux standards d'échange ainsi que des justifications complémentaires aux observations faites ci-dessous.

Si les critiques évoquées sur les IFC sont plutôt d'ordre technique et sommaires, celles portant sur le CityGML sont plus fournies et axées sur la structuration du standard. Nous souhaitons tout de même rappeler qu'il ne s'agit pas de choisir le standard le plus performant au détriment du second. Nous avons cherché à identifier les éléments intéressants et compatibles du CityGML pour les projets d'infrastructure, tout en sachant qu'il n'est pas au départ conçu pour cela. Les observations sont donc plus fournies pour le CityGML puisque les IFC sont dédiés aux projets de conception et que leur extension pour les projets d'infrastructure sont en développement. Ils sont donc susceptibles de mieux répondre à nos problématiques. Le concept de « niveau de détail » (LOD pour Level Of Detail) de CityGML est d'un intérêt certain pour notre proposition conceptuelle comme détaillé dans la section 1.1. Il était donc nécessaire d'étudier en détail le CityGML qui porte ce concept de LOD. Cette disproportion des critiques sera également présente dans la confrontation entre les Level Of Detail (LOD) de CityGML et les Level Of Development (LODt) pour les IFC mais pour d'autres raisons précisées le moment venu. Nous détaillons ci-dessous quelques observations sur des points clés qui limitent l'utilisation du CityGML dans notre contexte de conception d'infrastructure.

Aujourd'hui, la définition des IFC s'étend à l'ensemble des objets des projets d'infrastructures avec les *IFC bridge* notamment [Sang-Ho et Yeon-Suk, 2006 ; Lee et Kim, 2011 ; Yabuki et Li, 2006 ; Yabuki,

2. Nous souhaitons tout de même attirer l'attention du lecteur sur le fait que le rapprochement SIG et CityGML est moins évident et intime que le BIM et les IFC.

2009 ; Arthaud, 2007], *IFC alignment*³ ou les *IFC road* évoqués dans [Obergruesser et Borrmann, 2012]. Ces travaux nous apportent principalement la vision organique dont nous parlerons plus en détail dans les sections sur l'ingénierie système et la gestion des exigences de projet : il s'agit des objets réellement construits. Cette vision très concrète est différente de la vision *système* moins traitée dans les IFC comme l'évoquent les livrables du cas d'usage 3 du projet MINnD sur le développement des IFC Bridge [MINnD UC-3, 2016]. Donc le développement de l'IFD et des IFC progresse actuellement pour couvrir l'ensemble des objets liés à la construction.

Concernant le CityGML, le contenu de la *Norme de CityGML [2012]* est en grande partie construite par rapport à l'objet « bâtiment » [Groger et Plumer, 2012 ; Biljecki *et al.*, 2014b]. Les autres modules pour les ponts et tunnels sont basés le module bâtiment mais sont moins complets [Lowner *et al.*, 2013]. Le CityGML traite donc peu des objets liés aux projets d'infrastructures urbaines comme les ouvrages enterrés [Kruger et Kolbe, 2012]. Ensuite, la sémantique de CityGML est jugée faible en termes de contraintes par rapport à celle des IFC par exemple [Plume et Mitchell, 2007, 2011 ; Biljecki *et al.*, 2014a,b]. Il est possible d'ajouter des extensions au CityGML comprenant des classes d'objets spécifiques à certains métiers mais cela freine l'interopérabilité.

2.1.2 La structuration de l'information sur le projet L2 Marseille

Dans le cadre de ce projet L2 Marseille, en lien avec Egis, nous cherchions un moyen d'identifier chaque objet constituant l'infrastructure et de les repérer dans l'espace du projet. Nous travaillions donc à la décomposition du projet en objets. Notre objectif par ce travail n'était pas de proposer une structuration pour un format d'échange standard type IFC Bridge ou IFC Alignment dédiés aux infrastructures. Il s'agissait de définir une structuration commune de l'information dans une optique d'ingénierie concourante. Cette structuration devait permettre de définir les données à échanger entre acteurs : la définition du contenu des IDM passe par la structuration des objets.

La décomposition du projet L2 en objets provient du retour d'expérience du projet de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion ainsi que des préconisations et conclusion du projet Communic. Cette décomposition est une arborescence unique. Elle correspond à la vision commune que portent les acteurs d'un projet sur l'ouvrage à concevoir. Par conséquent, cette arborescence est hétérogène : elle lie des objets, des espaces et des objets abstraits comme des *Familles* (voir extrait en Annexe C). Nous allons décrire plus tard pourquoi ce type de structuration en un arbre unique n'est pas la plus pertinente dans notre contexte. Lors de l'application de cette structuration sur le projet L2, nous avons pu affirmer qu'il n'est pas possible de décomposer l'ensemble du projet avec ce type de décomposition sans faire des choix arbitraires. Citons un exemple de problème relevé : les caniveaux à fente de l'assainissement sont dédiés à une plateforme alors que le réseau des collecteurs est transversal à tous les espaces, comme l'ensemble des réseaux secs. Donc où se situent un caniveau à fente dans l'arborescence ? Est-il un composant de la section courante ? Est-il un composant du réseau d'assainissement ? Les possibilités sont multiples et aucune n'est plus pertinente qu'une autre dans l'absolu (voir Figure 2.1). Il n'est donc pas possible d'organiser l'ensemble des objets dans un seul arbre sans considérations de la sémantique liée à chaque métier.

Cette première arborescence unique ne satisfaisait pas l'ensemble de parties prenantes du projet mais ce travail a toutefois permis d'identifier les objets manquants et de mettre en lumière l'hétérogénéité dans les éléments de cette structuration unique (mélange de zones, d'ouvrages fonctionnels, de systèmes, d'éléments abstraits, d'objets concrets, etc.). Comme le rappelle Dartigues [2001], dans un contexte général d'ingénierie concourante, moins les informations sont structurées et plus leur modélisation est difficile. Notre expérience préliminaire de mise en place du BIM sur projet confirment cela. Nous reviendrons sur ce point dans la troisième partie du mémoire lors d'une proposition de solution. Notons

3. L'objet *alignment* est l'axe central d'un projet d'infrastructure. Il est commun à la route, aux ponts ou tunnels de l'infrastructure.

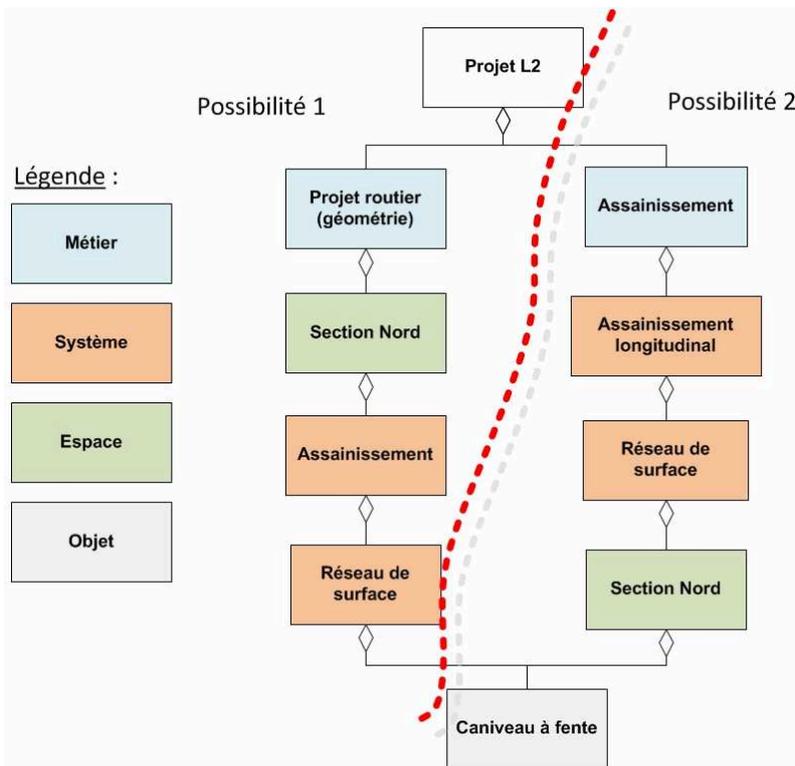


FIG. 2.1 – Deux décompositions partielles possibles d'un Projet : place du Caniveau à fente dans l'arborescence.

tout de même que ce types d'arborescence en arbre est pour le moment la seule qui soit possible d'exploiter dans les outils de modélisation pour la conception d'infrastructures. L'expérience sur le projet L2 a montré :

1. que la structuration des objets dépend des objectifs de modélisation ;
2. qu'il manque des outils conceptuels pour décrire le niveau de détail de ces décompositions selon les besoins (et donc pour définir le contenu des IDM) ;
3. que l'application des processus BIM pour garantir la qualité de l'information produite n'était possible que dans le cadre de réponses à des exigences et pas de manière générale sur le projet.

Nous partons donc du constat que la décomposition du projet en objets, le détail de cette décomposition et la précision des informations qu'elle contient ne peuvent être définis de manière unique. Ils sont tous fonction des besoins ou exigences auxquels il faut répondre. Il est donc nécessaire de conduire une étude des éléments qui contraignent le projet (besoins, réglementation, normes) et les limites de ce qui doit être considéré pour la réponse à ces exigences (acteur, donnée, processus, éléments contractuels et réglementaires). En effet, le constat principal sur ce projet était que **l'application du BIM s'est accélérée lors de la définition des objets à considérer pour répondre à des objectifs précis de conception** : citons notamment la préparation de l'audit de sécurité sur laquelle nous reviendrons en quatrième partie.

La section suivante présente les possibilités actuelles et leur limites pour la définition de processus dans le cadre de la mise en place du BIM. Pour rappel, nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent et pendant nos expérimentations préliminaires sur le projet L2 Marseille que :

1. le changement de paradigme de la conception est à la fois lié et concomitant avec le développement du BIM,
2. le BIM nécessite le développement de méthodes, de processus et d'outils conceptuels : le développement d'outils métiers et l'utilisation de standards d'échanges n'est pas suffisant.

2.2 Trois pistes pour la standardisation des processus

2.2.1 Les Information Delivery Manual

Pour BuildingSMART, il y a un manque de processus structurés et documentés pour utiliser efficacement le BIM. Il conviendrait de définir plus en détail la disponibilité de l'information ainsi que sa qualité [BuildingSMART, 2016]. Les IDM (Information Delivery Manual) visent à répondre à ce manque. Ils expriment les besoins en données de chaque acteur d'un projet. Ils décrivent les processus d'échange de l'information entre acteurs ainsi que l'information échangée elle-même. La norme ISO 29481 *Building Information Modeling - Informations Delivery Manual* [ISO 29481-1, 2012 ; ISO 29481-2, 2012] spécifie la méthode et le format pour décrire les IDM qui se résument en plusieurs actions :

- décrire les besoins en information entre les processus ;
- spécifier comment l'information doit être échangée entre les processus ;
- identifier les acteurs qui envoient et reçoivent de l'information ;
- définir, spécifier et décrire les informations échangées pour satisfaire les exigences à chaque point important du processus ;
- assurer que la définition, la spécification et la description des précédents éléments est utile et facilement compréhensible ;
- créer des spécifications détaillées de l'information saisie de manière à faciliter le développement des logiciels utilisant ces IDM ;
- veiller à ce que ces spécifications soient cohérentes avec les pratiques locales.

Notons qu'ils n'ont pas de lien direct avec les IFC, bien que ceux-ci puissent être un support solide pour définir les objets et attributs échangés et donc les MVD (voir pour rappel la section titre : BuildingSMART page 33). Un MVD définit un sous-ensemble des IFC qui a vocation à être échangé en lien avec les IDM. Il s'agit du support de la transcription en code informatique pour l'application d'un IDM. Mais comme pour ces derniers, il n'en existe pas de normalisé [Volk *et al.*, 2014]. Les IDM permettent en principe de répondre aux besoins des acteurs d'un projet pour la résolution de leurs exigences. Ils décrivent les étapes d'utilisation de l'information tout au long du projet.

Bien qu'il n'y ait pour le moment que peu d'éléments de définition et de normalisation des IDM, nous retenons que :

1. des travaux de normalisation sont en cours au niveau national au sein du programme PPBIM⁴ et au niveau européen au CEN/TC 442/WG 3⁵ ;
2. de nombreux travaux de recherche et de l'industrie de la construction concernent la définition du contenu des IDM : citons par exemple les conférences CIB W078 et W102 en 2011 et CIB W78 en 2015 [CIB W078 - W102, 2011 ; CIB W78, 2015].

Étudions maintenant un standard d'application du BIM. Nous avons cherché à évaluer l'intérêt de ces documents de standardisation pour la définition des échanges d'information (et donc des IDM et MVD) dans un contexte d'ingénierie concurrente.

4. http://www2.afnor.org/espace_normalisation/structure.aspx?commid=91249, consulté le 20/02/2016.

5. <http://www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=News.show&id=262>, consulté le 20/02/2016.

2.2.2 Le British Standard et ses documents applicatifs

Le British Standard « BS 1192 :2007 » [British Standard, 2007] est la norme britannique qui établit la méthodologie de gestion de la production, de la diffusion et de la qualité des informations d'un projet de construction en définissant les processus de collaboration et une politique de nommage. Il est applicable à toutes les parties d'un projet de bâtiment, de génie civil ou d'infrastructure, pour les phases de conception, de construction, d'exploitation et de déconstruction. Le BS 1192 :2007 repose largement sur le Code de procédure pour l'industrie de la construction britannique [British Standard, 2007].

Les PAS 1192⁶ sont les parties applicatives du BS 1192 pour les différentes phases du cycle de vie d'un ouvrage (citons notamment les PAS 1192-2 pour la conception et PAS 1192-3 pour l'exploitation). Ces standards proposent une structuration de l'information générale en trois « espaces » : espace de conception, espace de coordination et espace de partage (voir Figure 2.2). Les deux premiers sont similaires à la proposition du projet Communic. L'espace de partage peut être assimilé à la passerelle évoquée dans Communic entre la conception et la coordination (voir pour rappel la Figure 1.11 page 33).

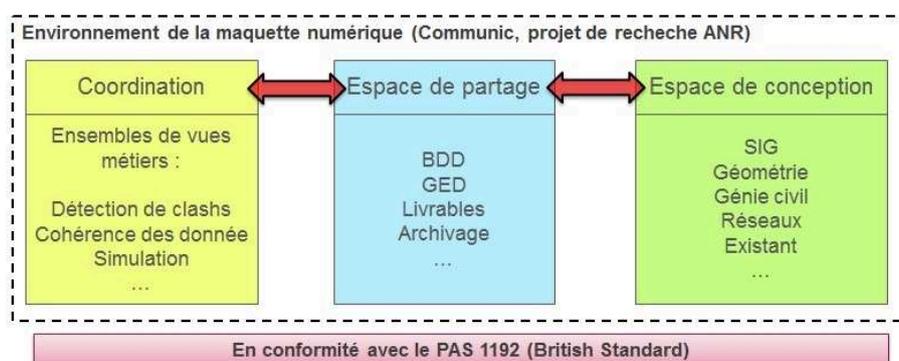


FIG. 2.2 – Structuration générale pour l'organisation des données sur le cycle de conception selon Communic (Environnement de la Maquette Numérique [Communic L1, 2010]) et le PAS 1192-2 [2013].

Le BS 1192 :2007 [British Standard, 2007] est le seul document réglementaire aussi précis sur les processus BIM et la structuration de l'information pour les projets de bâtiment mais également d'infrastructure. Il est cohérent avec les propositions du projet Communic. Nous nous en sommes inspirés pour mettre en place certains processus BIM sur projet (expérimentations préliminaires sur le projet L2 Marseille). Nous avons utilisé ce cadre pour identifier plus en détail les manques actuels et les besoins de la profession en terme de structuration de l'information selon ces espaces et selon les échanges entre espaces. Nous verrons également que le PAS 1192-2 [2013] est le seul document à évoquer les niveaux de développement (dont nous reparlerons plus tard) pour les projets d'infrastructure contrairement aux autres documents relatifs au BIM qui ne traitent actuellement que des projets de bâtiments.

Le BS 1192 :2007 apporte un cadre de réflexion pour l'implémentation du BIM. Mais il n'apporte pas de solution pour la définition du contenu des processus et le contrôle de la cohérence des échanges. Ainsi, il ne permet pas de développer une démarche méthodologique pour la définition du contenu des IDM.

6. PAS : Publicly Available Specifications : les PAS sont des documents de standardisation développés pour apporter une réponse rapide de standardisation pour des besoins urgents d'un marché.

2.2.3 Application du BIM par la définition d'objectifs : le concept de BIM use

En complément des IDM, un concept clés pour l'utilisation du BIM apparaît de plus en plus souvent dans les documents de référence (guides BIM comme [Penn State, 2011]) ainsi que dans les contrats : il s'agit des *BIM uses*, littéralement utilisation ou « usages du BIM ». Sont considérés par ce concept les acteurs, les échanges, les modèles et leur modélisation, c'est-à-dire à la fois les processus, les exigences et les objets avec leur représentation pertinente selon le contexte. Pour définir entièrement les IDM, des diagrammes de processus et quelques compléments de texte suffisent [ISO 29481-1, 2012]. Un BIM use à un champ d'action plus large : il permet de répondre directement à une ou plusieurs exigences comme l'évoquent Kreider et Messner [2013]. Les BIM uses doivent permettre de gérer les compromis entre plusieurs optimisation, par exemple, puisqu'ils décrivent l'ensemble des processus de réponse aux exigences, alors que les IDM ne prennent pas en considération un champs aussi large d'interactions. De plus, les IDM, d'après la définition de l'ISO 29481-1 [2012], doivent considérer l'environnement technologique alors que les BIM uses sont plutôt orientés vers des considérations contractuelles et managériales. En fait, un BIM use comprend dans sa définition un ou plusieurs IDM. Les BIM uses peuvent être contractuels pour imposer les processus d'échange et de structuration de l'information à tous les acteurs. Les processus de définition des BIM uses que nous allons développer ici pourront ensuite alimenter la construction d'IDM (et donc des MVD subséquents).

La modélisation du contexte urbain d'une infrastructure en conception nécessite l'intégration de plusieurs types de données, provenant de métiers différents, avec une approches et une structuration de l'information spécifiques. Certains concepts utiles à la définition du contenu des BIM uses sont en confrontation avec d'autres concepts similaires, provenant d'autres domaines métier. Nous pouvons citer en premier lieu les concepts de « niveau de détail » et de niveau de développement évoqués en section 1.1. La définition du contenu des BIM uses nécessite une cohérence dans les moyens des structurer l'information qui se confrontent dans les projets d'infrastructures.

Des travaux de recherche récents démontrent la nécessité de développer des IDM pour exploiter au mieux les processus BIM [CIB W078 - W102, 2011 ; CIB W78, 2015 ; MINnD UC 6-1, 2016] (par exemple, 11 publications sur 88 dans la dernière conférence du CIB W78 [CIB W78, 2015] traitaient entièrement ou partiellement des IDM). Pourtant, il n'existe aujourd'hui aucun IDM de défini pour les projets d'infrastructures. Il en existe 44 pour les projets de bâtiment, dont deux seulement sont approuvés par la profession mais aucun n'est encore normalisé [Berard et Karlshoej, 2011]. La normalisation existante autour des IDM ([ISO 29481-1, 2012 ; ISO 29481-2, 2012]) ne définit qu'une méthode et un format pour **décrire** le contenu des IDM. Mais il n'existe aucun document proposant une méthode ou des outils pour **définir** le contenu de ces IDM ou des BIM uses. Pour résumer les conclusions de ce retour d'expérience, nous pouvons lister plusieurs éléments de problématique.

- La structuration de l'information du projet et la définition des objectifs de chaque BIM use sont des préalables indispensables à la définition de leur contenu.
- Quelle méthode utiliser pour définir les limites du BIM use (éléments contractuels, réglementation, exigence) ?
- Quelle méthode appliquer pour définir de manière cohérente le contenu des BIM uses et répondre à l'ensemble des exigences du projet ? Comment connaître de manière méthodique les éléments pertinents à échanger selon les exigences (information, représentation) ?
- Les nombreuses exigences et leurs relation multi-disciplinaires nécessitent une vision holistique du projet. Comment développer cette approche globale ?
- Les outils pour aider à la définition du contenu des BIM uses posent problème (« niveau de détail ») : définition pas suffisamment précise et incompatibilités entre métiers.
- Structuration de l'information insuffisante pour satisfaire tous les points de vue : besoins de

multi-représentation non satisfaites, structuration de l'information arbre unique, difficulté d'utilisation de modèles multi-scalaires, problèmes de gestion de la sémantique multi-acteurs ou multi-disciplinaires.

Le BIM use est le concept qui crée le lien entre les IFC, l'IFD et les IDM et MVD (voir pour rappel la section 1.2.3 page 33). Les IFC et IFD ne concernent pas directement notre travail, de nombreux travaux sont en cours sur ces deux sujets. Par contre, la définition du contenu des IDM et donc des BIM uses nous concerne complètement comme nous venons de le décrire tout au long de ce chapitre. Nous avons également évoqué le fait qu'il manque pour cela une méthodologie ainsi que des outils conceptuels. La question du niveau de détail ou de développement réapparaît donc ici. Ce concept constitue un outil pertinent pour organiser la structuration de l'information et le contenu des IDM mais nous avons évoqué dans le chapitre précédent les difficultés liées à son utilisation. Nous étudions cette importante question dans la troisième partie de ce mémoire.

Les moyens (outils et méthodes) industriels utilisés dans la construction ne permettent pas de définir le contenu d'un IDM ni d'un BIM use. Nous avons donc recherché des solutions dans d'autres industries pour faciliter la définition des exigences à traiter pour évaluer les besoins en information ainsi que les acteurs concernées. La deuxième partie de ce mémoire vise à présenter ces outils et méthodes : ingénierie système et ingénierie des exigences. La problématique de la structuration des objets par rapport aux besoins (« niveau de détail ») sera traitée dans la troisième partie. Mais avant cela, nous souhaitons aborder un dernier axe de réflexion pertinent par rapport aux interrogations ci-dessus. Le défi sémantique auquel nous devons faire face a été évoqué tout au long de cette première partie. En réadaptant les propos de Fléty [2014], nous pouvons écrire que la multitude des contextes et profils des acteurs utilisant un vocabulaire spécifique et différents types d'informations, mènent à une forte hétérogénéité d'intérêts, de raisonnement et de besoins. Il devient alors nécessaire de recourir à des outils reconnus pour leurs apports en termes de cohérence et d'explicitation de sémantique, pour un partage de données contextualisées, c'est-à-dire d'information. Les ontologies de domaines présentent en ce sens des caractéristiques intéressantes. Également, « Si le développement de systèmes d'information s'est toujours heurté à des problèmes sémantiques, l'objet principal des ontologies est de lever ces ambiguïtés » [Flety et De Sede, 2009]. Nous allons donc analyser en quoi les ontologies apportent une aide structurante dans notre réflexion.

2.3 La nécessaire considération des ontologies

2.3.1 Définition et exemple d'exploitation d'ontologies

L'exploitation d'ontologies réapparaît depuis une quinzaine d'années en partie du fait des possibilités des nouveaux outils informatiques pour la construction et la gestion d'ontologies [Teulier *et al.*, 2005]. Le concept d'ontologie semble actuellement en plein regain d'intérêt, poussé notamment par le web sémantique. Ce concept s'introduit dans de nombreux domaines dont l'ingénierie des connaissances, la représentation de connaissances, la modélisation qualitative, l'analyse orientée-objet, l'extraction d'informations, ou encore l'interopérabilité entre systèmes d'information [Flety et De Sede, 2009].

Définissons tout d'abord ce concept. Une des définitions de l'ontologie qui fait autorité est celle de Gruber [1993] : « Une ontologie est la spécification d'une conceptualisation. [...] Une conceptualisation est une vue abstraite et simplifiée du monde que l'on veut représenter ». Cette définition est proche de celle d'un modèle que nous verrons dans la partie suivante. Gruber ajoute qu'une spécification d'un vocabulaire de représentation pour un domaine partagé du discours - définition des classes, des relations, des fonctions et autres objets - est appelée une ontologie. Une ontologie est par ailleurs spécifique à un domaine métier et au point de vue de l'acteur qui la définit, pour des objectifs précis. Pour Fankam

et al. [2009], une ontologie est une représentation formelle, référençable et consensuelle de l'ensemble des concepts partagés d'un domaine sous forme de classes, de propriétés et de relations qui les lient. Également, une ontologie définit les termes et concepts (sens) utilisés pour décrire et représenter une connaissance. Une ontologie peut aller de la taxonomie (connaissance avec un minimum de hiérarchie ou structure Parent-Enfant) au thésaurus ou lexique (mots et synonymes) ou modèles conceptuels (avec une connaissance plus complexe), à la théorie de la logique (avec une connaissance très riche, complexe, consistante et sensée) [Hammoudi, 2010]. Enfin, « En informatique, une ontologie est un ensemble structuré de concepts organisés dans un graphe de relations qui peuvent être des relations sémantiques ou des relations de composition et d'héritage au sens objet. C'est donc l'ensemble des termes organisés en réseaux maillés et en particulier par rapport à des concepts qui permettent de décrire un univers de connaissances. » [MINnD, 2014]. **Ce dernier point, « univers de connaissance » nous intéresse particulièrement, notamment dans le cadre de la définition du contenu des BIM uses.**

Des travaux cités dans [Flety et De Sede, 2009] distinguent différents « niveaux d'abstraction⁷ » pour les ontologies.

- Les ontologies génériques, de haut niveau, contiennent des conceptualisations valables dans différents domaines tel le temps, les lieux, une entité, etc.
- Les ontologies de domaines s'attachent à décrire le vocabulaire relatif à un domaine particulier mais elles restent génériques pour ce domaine [nous pourrions citer par exemple, en géomatique, les travaux de Parent *et al.* [1997] qui ont développé en amont le modèle de MADS (Modélisation d'Applications à Données Spatio-Temporelles) que nous évoquerons plus tard et qui définissent des concepts spatiaux, ou bien le projet Towntology⁸ pour l'urbanisme [Teller *et al.*, 2013]].
- Les ontologies d'application sont composées de concepts dérivés de tous les types d'ontologies précédents. [Ces ontologies émanent de groupes particuliers travaillant sur des applications spécifiques].

Étant donné l'immensité du domaine des ontologies, il convient d'en limiter l'étendue en accord avec nos besoins. Comme mis en évidence ci-dessus, nous souhaitons utiliser les ontologies pour structurer les nombreux univers de connaissances des acteurs dans un projet d'infrastructure. Ainsi, nous n'utiliserons dans notre proposition que le concept d'ontologie de domaine.

Le besoin d'ontologies pour les études en génie urbain, nécessairement pluridisciplinaires comme le démontrent Dupuy et Benguigui [2015], est évoqué depuis de nombreuses années : parmi les conclusions de son travail de recherche, Diab [2000] évoque le besoin de travailler à un « lexique commun » pour faciliter les interactions entre acteurs. Dans l'étude de faisabilité du projet MINnD, les ontologies sont jugées comme indispensable pour se comprendre, au-delà de la seule interopérabilité logiciel [MINnD, 2014]. Les ontologies jouent un rôle clé dans la représentation et dans l'utilisation des connaissances. Elles fournissent une définition cohérente et non ambiguë du vocabulaire utilisé pour représenter la connaissance, mais elles ne se limitent pas à de simples listes de termes ; elles doivent aussi fournir l'interprétation sémantique de ces termes [Teulier *et al.*, 2005]. La construction d'un modèle conceptuel de donnée fait appel explicitement ou implicitement à des ontologies comme l'évoquent Billen *et al.* [2008] ou Kreider et Messner [2015]. Abadie et Mustière [2008] citent des travaux qui justifient la nécessité d'utiliser des ontologies pour résoudre les problèmes liés à l'« hétérogénéité sémantique » dont il est question notamment dans la gestion de l'interopérabilité. D'ailleurs, plusieurs solutions d'interopérabilité technique à base d'ontologies existent dans la littérature et ont été implémentées avec succès pour le domaine de la construction ou le milieu urbain [Montenegro et Duarte, 2009 ;

7. Nous écrivons ici *niveau d'abstraction* puisqu'il s'agit de l'intitulé utilisé par Flety mais par la suite, ce que nous appellerons *niveau d'abstraction* aura une autre signification.

8. <http://www.towntology.net>

El-mekawy et Östman, 2010 ; Costa, 2011 ; Billen *et al.*, 2014]. C'est donc un concept totalement en rapport avec les problématiques que nous souhaitons résoudre. Les ontologies permettent de faire le lien sémantique entre les objets du MCD et, par exemple, la formalisation des règles (ou exigences du projet) [Allemang et Hendler, 2011]. Les ontologies apportent un lien fort entre les concepts et l'information elle-même.

Par contre, les ontologies pour le domaine de la géographie sont peu nombreuses [Abadie et Mustière, 2008], mais c'est également le cas des ontologies pour la construction d'infrastructures et la modélisation du milieu urbain. Évoquons tout de même certains travaux sur une ontologie pour l'urbanisme (<https://cybergeog.revues.org/8322>), les infrastructures souterraines pour limiter les conflits entre systèmes [Métral *et al.*, 2013] ou pour structurer la multi-représentation en fonction des besoins de chaque acteur, appelés « besoins multi-contexte », ce qui correspond parfaitement à nos besoins [Mtibaa et Jaziri, 2007]. La Figure 2.3 donne un exemple d'ontologie pour l'étude de la biodiversité dans un projet d'infrastructure. Directement en lien avec le BIM, les ontologies permettent la définition de langages communs de communication afin d'atteindre des objectifs partagés par plusieurs acteurs d'un projet [Kreider et Messner, 2015]. Selon les auteurs, la nécessité d'une utilisation des modèles d'ontologies a été identifiée au cours de l'élaboration du *Guide de planification de l'exécution du projet BIM* (guide [Penn State, 2011]). Elle permettraient de donner une cohérence dans le contenu des différents BIM usés. C'est dans cette optique que nous évoquons le sujet des ontologies de domaine. Enfin, d'après l'analyse de Métral *et al.* [2013], l'utilisation des ontologies apporte une meilleure gestion de la connaissance dans trois domaines importants :

1. la communication entre les personnes ayant des besoins et des points de vue différents,
2. l'interopérabilité entre les systèmes hétérogènes,
3. l'ingénierie des systèmes.

Notre contexte de réflexion est en premier lieu identique aux deux premiers points. De plus, nous allons utiliser l'ingénierie système comme aide pour l'adaptation de nos pratique au changement de paradigme de la conception évoqué en section 1.2. L'utilisation des ontologies est donc ainsi parfaitement justifiée.

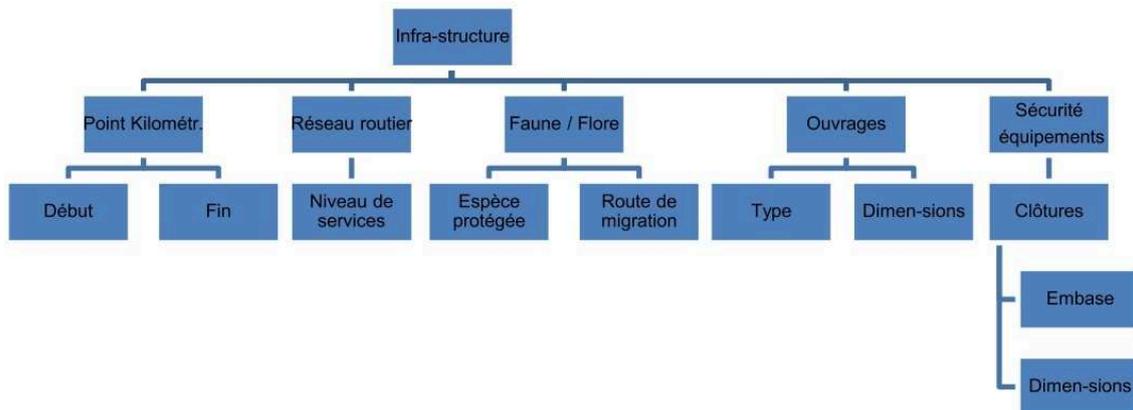


FIG. 2.3 – Proposition d'ontologie partielle pour l'étude de la biodiversité dans un projet d'infrastructure, d'après [MINnD, 2014].

Évoquons tout de même quelques limites dans l'utilisation des ontologies. La création d'une seule et même ontologie du domaine permettant l'intégration de tous les points de vue existants reste extrêmement coûteuse et difficilement réalisable [...], voire peu souhaitable. Il semble donc important que chaque communauté d'acteurs de l'information géographique constitue sa propre ontologie du domaine, reflétant son point de vue sur le monde, et explicitant la sémantique des concepts partagés par ses membres [Abadie et Mustière, 2008]. Nous retrouvons ici la logique de la définition de plusieurs BIM

uses avec leur sémantique propre pour notre contexte de travail. De plus, bien qu'une ontologie soit définie pour être réutilisable, Fléty [2014] explique clairement qu'une ontologie de domaine ne devrait pas être dissociée de son cadre d'étude. Ainsi, la méthode que nous cherchons à établir pour définir le contenu sémantique des BIM use doit être le plus générique possible.

2.3.2 Conclusion sur l'apport des ontologies

D'après les éléments ci-dessus, les ontologies permettraient de définir la sémantique liée à chaque BIM use et de la rendre cohérente avec d'autres BIM uses, qui utilisent les mêmes concepts ou objets mais avec un contexte métier différent. Il existe une proposition de méthode pour l'établissement d'ontologies métier [Kreider et Messner, 2015], voir d'ontologies multi-contexte [Mtibaa et Jaziri, 2007]. Mais attention : une ontologie décrit la structure d'un domaine, mais pas celle de la base de données ou du Modèle Conceptuel de Données (MCD) [Fléty, 2014]. Le modèle conceptuel définit la sémantique utilisée alors qu'une ontologie ne décrit que les concepts et relations dans l'absolu. Les ontologies constituent en fait une abstraction supérieure au MCD. Par conséquent, nous n'allons pas travailler à la définition des ontologies pour les projets d'infrastructures. Nous utilisons ce concept pour structurer notre démarche : la question de la sémantique de chaque BIM use renvoie à la question des ontologies ou des univers du discours à utiliser.

Nous avons jusqu'à maintenant évoqué de nombreux sujets, verrous ou concepts. Il devient nécessaire de présenter comment nous avons structuré notre réflexion ainsi que la rédaction de ce mémoire de thèse en considérant tous ces éléments.

2.4 Présentation de la démarche de travail

Tout d'abord, nous présentons dans la Figure 2.4 une synthèse des verrous décrits dans cette première partie qui freinent la définition du contenu des BIM uses. Nous les avons associés à trois axes de réflexion. Ils sont traités chacun dans une partie de ce mémoire comme indiqué dans cette Figure 2.4.

Les relations entre les verrous et axes de réflexions sont multiples. Il n'était donc pas possible de les traiter linéairement. Les premiers retours d'expérience ainsi que les résultats du projet de recherche Communic [Communic L1, 2010 ; Communic L2, 2010 ; Communic L3, 2010] ont montré qu'une proposition uniquement basée sur les besoins opérationnels n'était pas suffisante et nécessitait des approches conceptuelles solides pour une utilisation à plus long terme. Par ailleurs, le changement actuel des pratiques de conception nous invite à utiliser des outils méthodologiques d'autres industries avec une composante conceptuelle forte. Pour établir une logique de travail en fonction des éléments de la Figure 2.4, nous avons donc choisi de traiter notre sujet avec deux approches :

- une approche par le haut (*top - down*) pour la mise en place d'outils conceptuels provenant parfois d'autres industries (aéronautique ou automobile par exemple : nous pouvons citer l'ingénierie système, l'ingénierie des exigences, la modélisation objet et l'utilisation de formalismes de modélisation) et pour délimiter notre problématique,
- une approche par le bas (*bottom - up*) pour alimenter notre proposition de modèle conceptuel avec des éléments métier concrets et évaluer l'applicabilité dans notre contexte industriel des outils conceptuels retenus en approche *top - down*.

Cela se traduit par :

1. une proposition conceptuelle de structuration par les exigences appuyée par les concepts de *niveaux* évoqués en section 1.1 ;
2. un travail d'expérimentation au travers de cas d'usages pour compléter et valider le MCD proposé.

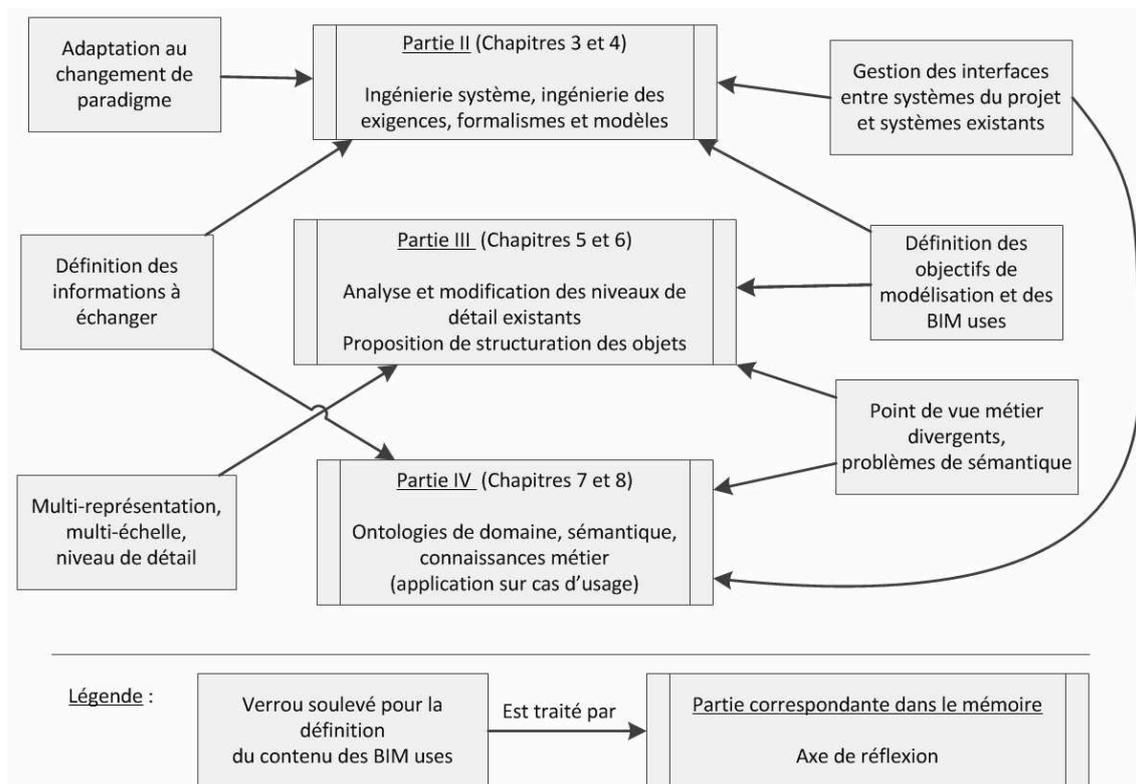


FIG. 2.4 – Illustration de nos axes de recherche identifiés pour répondre aux verrous décrits dans cette première partie. L'ordre des cases « verrou » est choisie pour la lisibilité de la figure et non selon leur ordre d'apparition dans cette première partie.

Cette double approche est possible puisque des travaux antérieurs fournissaient des éléments préliminaires à la partie conceptuelle et que des cas d'usages préliminaires avaient permis de cibler les points bloquants et domaines métier à expérimenter. Ces allers et retours entre approches est indispensable puisque comme le rappellent Charroux *et al.* [2010] dans leur ouvrage sur les pratiques de la modélisation en UML, la modélisation objet est un processus itératif.

Pour structurer la démarche proposée dans les parties suivantes, certains travaux sur les approche *top-down* et *bottom-up* ont été consultés, notamment [Pizka et Bauer, 2004 ; Roussel *et al.*, 2014]. Comme nous l'illustrons dans la Figure 2.5, les connaissances et retours d'expériences préliminaires ont permis de structurer notre démarche. La Figure 2.5 présente cette double approche. L'approche *top-down* apporte un cadre structurant dans notre démarche d'analyse de l'existant et dans la structuration de nos expérimentations par cas d'usage. Le fait que ces outils aient été éprouvés dans d'autres industries apporte une cohérence globale dans notre proposition à la fois sur la partie méthode (B) et sur la partie structuration de l'information (C). L'approche *bottom-up*, grâce aux cas d'usage, apporte des éléments opérationnels à notre proposition de modèle conceptuel : nous avons ainsi adapté ces outils aux problématiques de notre industrie de la construction. La vérification de l'applicabilité opérationnelle de notre proposition se base sur ces cas d'usage.

Enfin, en cohérence avec les axes de réflexion identifiés ci-dessus (Figure 2.4), nous souhaitons apporter une précision visuelle pour aider à la compréhension de la structure de ce mémoire : comme l'illustre la Figure 2.6, les Parties II et III sont complémentaires et contiennent toutes deux une partie de notre proposition.

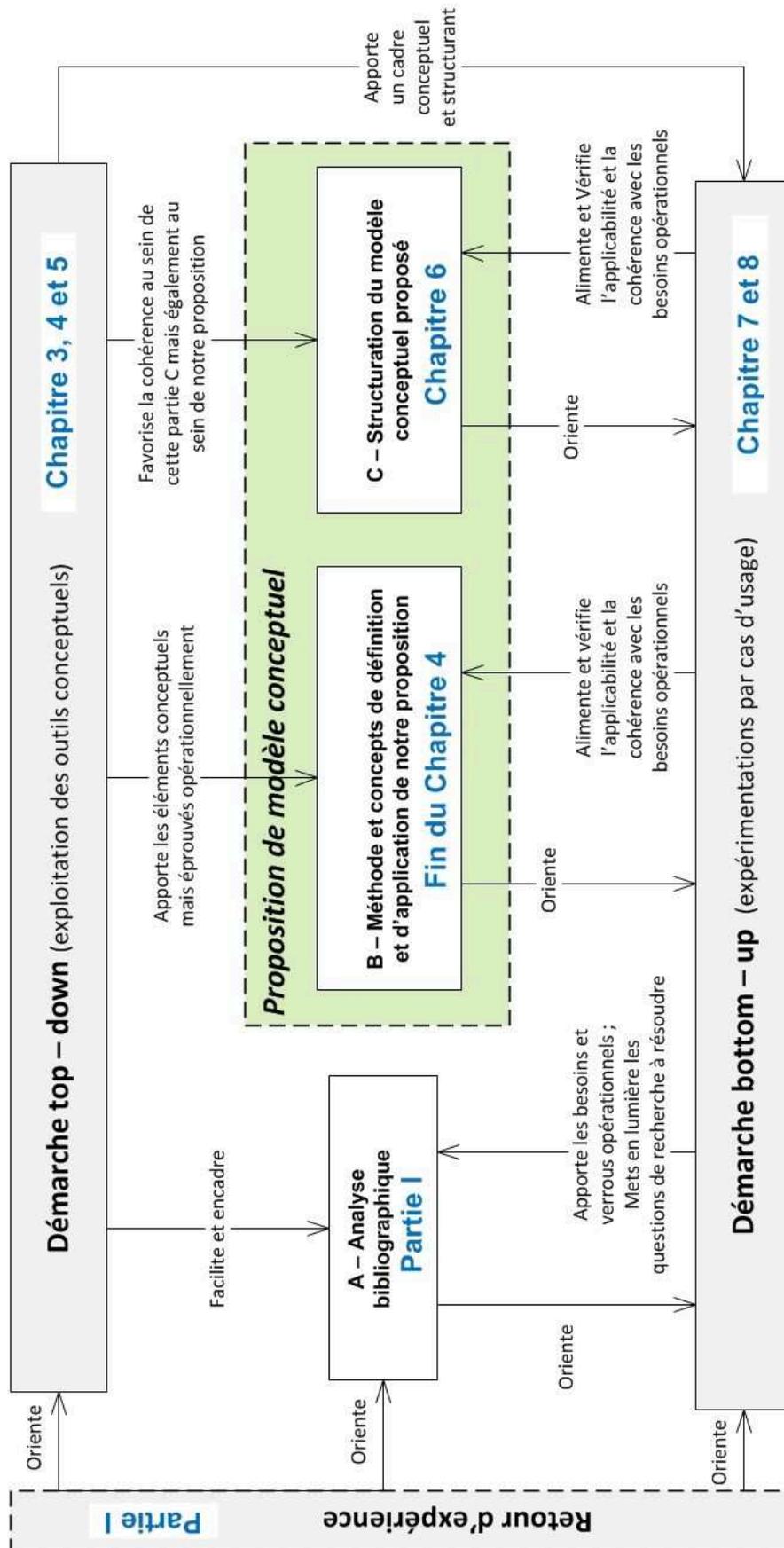


FIG. 2.5 – Illustration de notre démarche de recherche et positionnement de notre proposition de contribution.

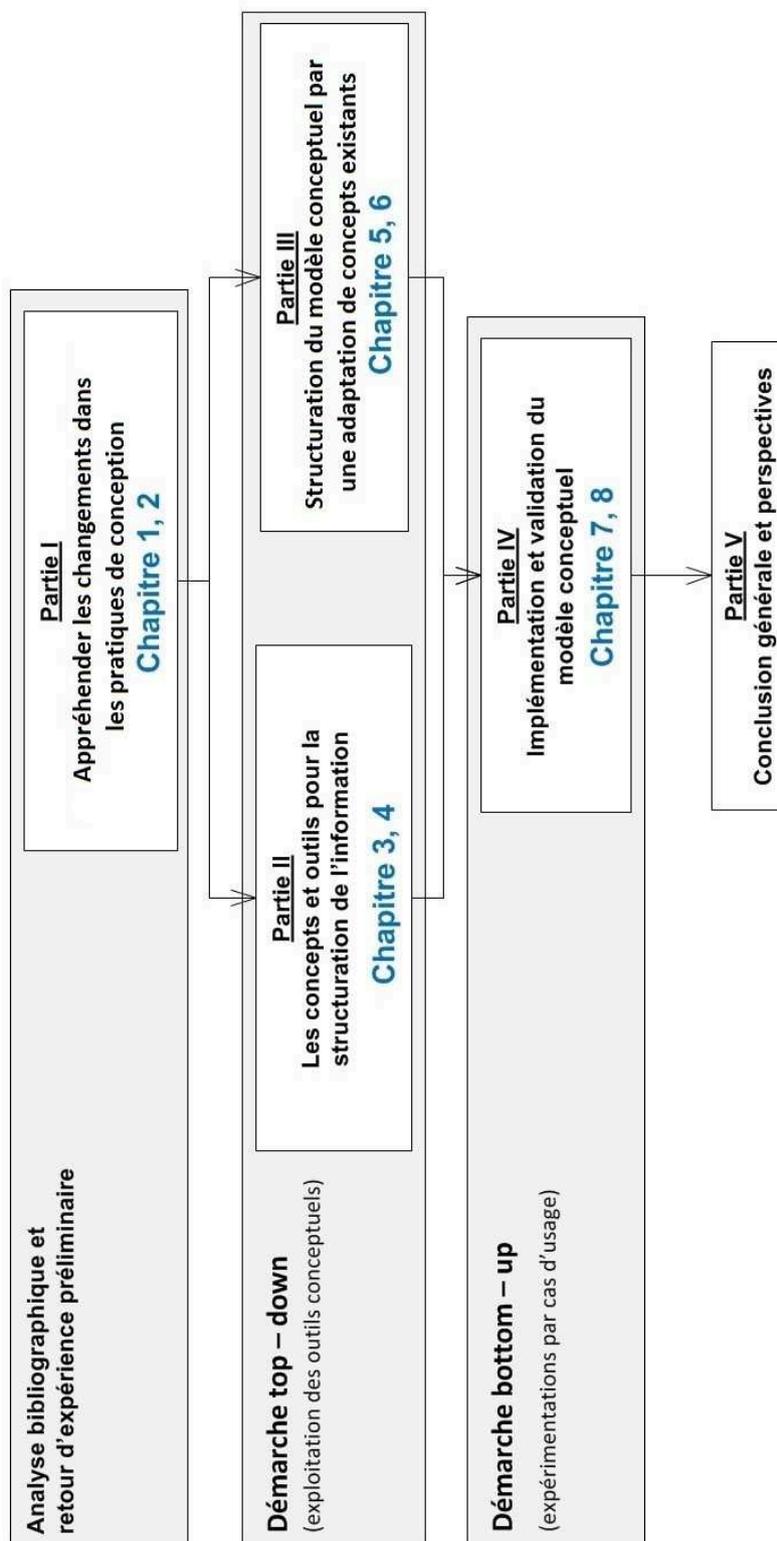


FIG. 2.6 – Représentation de l'organisation de ce mémoire.

Conclusion de la première partie

Les problématiques évoquées tout au long de cette première partie affichent des interactions fortes. La seule pratique sur projet et les expérimentations ne suffisent pas à les résoudre. Modéliser la complexité d'une infrastructure en vue de répondre aux besoins des acteurs et des processus d'ingénierie concurrente évoqués dans cette première partie n'est pas trivial. Nous souhaitons dans cette conclusion, évoquer la citation suivante :

La représentation de l'espace et des objets dans l'espace sera un des thèmes centraux de la science de la conception.

Herbert [Simon](#), 1982.

Avec cette phrase annonciatrice, H. Simon ne s'est pas trompé. 30 ans après, la problématique centrale de la conception d'infrastructures concerne bien la représentation de l'espace et des objets dans l'espace. Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, les changements d'échelles de travail et les représentations multiples des objets sont liés d'une manière ou d'une autre. Nous avons vu également que selon l'échelle, une infrastructure était toujours connectée avec l'espace dans lequel elle s'inscrit mais de différentes manières en fonction du point de vue des acteurs. Malgré le changement de paradigme de la conception et le besoin de décorrélérer la modélisation et l'échelle de travail, la représentation des objets dans l'espace et de l'espace lui-même reste un sujet présent tout au long de notre réflexion.

Nous avons identifié dans cette partie les principaux verrous qui limitent une utilisation efficace du BIM sur projet d'infrastructures urbaines. Ces projets se révèlent particuliers de par leur relation à l'espace et de par leurs interactions avec les mondes de l'information géographique et du génie civil. Ensuite, le secteur de la construction est actuellement en pleine transformation. Les pratiques évoluent ainsi que les mentalités, notamment sur la valeur de l'information et donc l'importance de sa qualité. Nous devons donc proposer un modèle conceptuel en phase avec ces évolutions. Enfin, nous avons décrit les manques de structuration de l'information. Nous avons identifié les ontologies comme outils pertinents pour aider à la définition du contenu des échanges d'informations. Nous avons également présenté les acteurs qui, à tous les niveaux, participent à ces changements et à l'arrivée du BIM. Cela montre une prise de conscience large de la profession. Il reste toutefois de nombreux points bloquants : certains sont techniques et organisationnels (nous en traitons certains dans ce travail). D'autres se maintiennent dans les mentalités : nous ne considérons pas cet aspect du frein au changement mais nous gardons à l'esprit que notre proposition, par les modifications qu'elle apporte dans la manière de concevoir et de gérer l'information, sera également confrontée à des difficultés d'adaptation des collaborateurs humains qui suivront ces propositions.

La définition et le fonctionnement du concept de « niveau de détail » sont des sujets au centre de notre travail. C'est un outil indispensable à la définition de l'information à échanger et donc à la

définition des BIM uses. Toutefois, il n'existe en fait pas qu'une seule définition du « niveau de détail ». Certaines décrivent par exemple le contenu des livrables de chaque phase : nous verrons pourquoi utiliser ce concept ainsi n'est pas pertinent. Ensuite, ces définitions sont difficilement exploitables lors d'un projet de conception du fait de leur hétérogénéité : elles peuvent s'avérer contradictoires lors d'une utilisation simultanée de ces définitions. Il est donc indispensable d'étudier ces différents concept qui régissent le détail ou la précision de l'information. Ce sujet fait l'objet de la troisième partie. Toutefois, avant d'étudier précisément des niveaux et d'en proposer une définition en cohérence avec nos besoins, il convient de définir précisément ces besoins. Nous avons identifié que les développements en cours dans le secteur de la construction ne sont pas suffisants et que certains outils méthodologiques comme l'ingénierie système devaient être exploités dans cette optique. Pour cette raison, la deuxième partie propose une démarche de définition des besoins auxquels il faut répondre dans le projet en utilisant ces outils. Cette méthodologie que nous proposons en fin de deuxième partie fait partie de notre proposition pour définir et structurer le contenu des BIM uses. Une fois cette méthode établie, il est possible d'identifier les questionnements auxquels les niveaux de détail, de développement ou autres, doivent répondre pour définir ce contenu.

Enfin, nous avons mis en évidence la nécessité de travailler à la fois sur les processus d'exploitation du BIM et sur la structuration de l'information en lien avec les standards existants. Le concept de BIM use est donc bien indispensable dans ce contexte. La définition des concepts métiers de chaque BIM use nécessite la considération d'outils sémantiques comme les ontologies. Cette approche fait partie des premières étapes d'un processus de modélisation. Nous détaillons dans la partie suivante l'intérêt de commencer par l'identification de la sémantique de chaque BIM use, en rapport avec les exigences à satisfaire et les acteurs qui participent à ce BIM use.

Deuxième partie

APPROPRIATION DES CONCEPTS ET OUTILS POUR LA
STRUCTURATION DE L'INFORMATION

Introduction de la deuxième partie

Avant de traiter la problématique des niveaux de détail (troisième partie), nous devons définir les besoins auxquels ce concept doit répondre dans un projet de conception. Nous allons dans cette partie décrire et adapter des outils méthodologiques existants pour définir les éléments à considérer lors du traitement et du contrôle de chaque exigence. Comme l'évoque la citation ci-dessous, pour chaque exigence à traiter, il existe un espace informationnel pertinent. Il nous revient de développer une méthode pour le définir. Ainsi, nous aurons les principaux éléments pour identifier les échanges entre acteurs du projet et décrire le contenu des BIM uses. Nous avons évoqué dans la première partie le manque d'outils conceptuels pour cette tâche. Cette partie décrit ceux que nous avons retenus et comment nous proposons de les exploiter pour les projets d'infrastructures.

Chaque problème définit son propre espace d'information.

William S. Schwartz (1896 - 1977).

Le premier chapitre de cette partie traite des outils conceptuels qui seront exploités dans le reste de ce mémoire. Il comprend donc des concepts liés à la modélisation ainsi que des formalismes permettant de retranscrire de manière formelle et normalisée l'application des concepts de modélisation. Le deuxième chapitre présente l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences qui sont des méthodes de travail. Nous décrivons leur application pour le secteur de la construction d'infrastructures. Ces outils ont deux rôles : premièrement, ils servent à établir un cadre et une méthodologie pour notre travail de recherche ; deuxièmement, ils servent d'outils pour l'application opérationnelle de notre proposition. La fin de ce deuxième chapitre comprend la partie méthodologique de notre proposition de modèle conceptuel. Elle exploite les éléments considérés dans cette deuxième partie. Elle décrit notamment la manière d'identifier l'ensemble des exigences ainsi que les éléments du projet qui les imposent.

Concepts et formalismes pour la structuration de l'information

La simulation ou modélisation n'est qu'une approche parmi d'autres, une méthode complémentaire d'étude. Elle n'apporte jamais la solution exacte, seulement les prémices ou de nouvelles hypothèses.

Le microscope, vers une vision globale. Joël De Rosnay [1975].

Cette citation évoque plusieurs éléments traités dans ce chapitre. Tout d'abord, la notion de modélisation qui n'apporte jamais la « solution exacte » : ceci est la conséquence de la définition même de la modélisation qui est une simplification de la réalité. Il n'est en effet pas possible de modéliser l'ensemble de la réalité dans ses moindres détails. Cette impossibilité provient de la complexité à tout modéliser, du manque de connaissance de l'homme et surtout, du fait qu'une modélisation comme nous allons le voir, répond à des besoins spécifiques qui n'interrogent pas toute la réalité du monde. Ensuite, c'est effectivement une « approche parmi d'autres ». C'est un support complémentaire à la conception. Cela signifie que notre proposition de modélisation s'inscrit dans un ensemble agissant pour la conception de l'infrastructure, le projet. Nous souhaitons donc par notre travail contribuer aux processus d'ingénierie concourante.

Nous avons présenté plus haut les verrous à traiter autour de la définition du contenu des IDM et des BIM uses. La manière de décrire le contenu des IDM est normalisée. Par contre, ni le contenu ni la méthode de sa définition ne sont normalisés. Il n'existe pas, à ce jour, de réelle méthode éprouvée pour définir ce contenu. Les outils méthodologiques actuels liés au BIM ne sont pas suffisants. Pour définir le contenu d'un BIM use, qui interroge une parties du modèle globale de l'infrastructure, nous avons besoin :

1. d'outils conceptuels pour appuyer notre réflexion et conserver une cohérence entre les parties de modèle utilisées, d'autant plus que ces extraits de modèles possèdent des éléments communs,
2. de méthodologies d'analyse pour identifier les éléments pertinent à extraire du modèle global en fonction des exigences identifiées au préalable.

Nous avons dans un premier temps cherché un cadre méthodologique pour définir les exigences à satisfaire et définir les limites du sujet étudié selon ces exigences. Sur la base des travaux préliminaires du projet Communic, notre intérêt s'est porté sur certains outils utilisés par d'autres industries pour résoudre des problématiques similaires. Nous décrivons dans ce chapitre les concepts et outils qui nous permettent dans le chapitre suivant de proposer une contribution aux processus actuels de conception dans une optique d'ingénierie concourante. Ces éléments nous serviront tout au long de ce mémoire de thèse. Ce

chapitre se compose de deux parties. Tout d'abord, nous présentons certains concepts généraux liés à la modélisation : nous évoquons les notions de modèle, de modèle conceptuel de données et d'objet. Elles nous apporteront pour la suite des outils conceptuels éprouvés. Nous étudions également une proposition de processus de modélisation en trois étapes, tout à fait pertinent, et qui apporte un appui solide pour le processus de définition du contenu d'un BIM use. Nous évoquons également la notion de généralisation de données. Elle n'est pas totalement applicable dans notre contexte mais cette démarche de simplification de l'information doit être considérée puisqu'elle est liée au concept de LOD que nous étudions dans la troisième partie de ce mémoire. Nous évoquerons également plus en détail la notion d'ontologie très présente tout au long de ce mémoire. Elles sont pour nous un outil incontournable pour structurer de l'information sémantique métier en fonction d'un contexte d'utilisation. Nous étudions dans la seconde partie de ce chapitre les formalismes retenus pour aider à la structuration et à la cohérence de notre proposition. Ces formalismes sont pour certains adaptés à toutes sortes de modélisation. D'autres sont adaptés à nos besoins comme PERCEPTORY, particulièrement pertinent pour montrer de manière claire les dimensions des espaces, des objets et de leur représentation géométrique.

3.1 La notion de modèle

Comme l'explique [Hammoudi \[2010\]](#), il n'existe pas à ce jour de définition universelle de ce qu'est un modèle (tout comme il n'existe pas de définition universelle de ce qu'est un objet[. . .]). Néanmoins, une définition fait consensus : « A model is a simplification of a system build with an intended goal in mind. The model should be able to answer questions in place of the actual system ». Nous souhaitons également évoquer la définition de [Berti-Equille, 2012](#) :

Un modèle est une représentation abstraite de la réalité. Cette représentation résulte d'une spécification utilisant un ensemble de notations. La notation fournit la sémantique formelle qui permet l'analyse. La spécification est liée à la phase de définition de la réalité.

Il est nécessaire également de citer une définition dans un contexte orienté bases de données géographiques : un modèle définit le réceptacle [le cadre] dans lequel les objets sont représentés, c'est à dire la manière dont ils sont spatialisés et organisés entre eux [\[Brasebin, 2014\]](#). Pour [Allemang et Hendler \[2011\]](#), dans un contexte de web sémantique et d'ontologies, les modèles aident à comprendre le monde, en formant une description abstraite qui cache certains détails tout en éclaircissant d'autres. Ce sont des abstractions qui peuvent prendre de nombreuses formes. Les modèles, bien qu'ils décrivent le monde d'une manière non objective, aident à communiquer à propos de phénomènes primitifs ou complexes et permettent la médiation entre points de vue différents. En effet, pour [Roques \[2014\]](#), un modèle constitue une représentation abstraite d'un système destiné à en faciliter l'étude et à le documenter. Citons enfin une définition épurée mais pertinente pour notre contexte de travail : « un modèle est une représentation d'un système, en vue d'agir sur ce système » [\[Kubicki, 2006\]](#). Pour illustrer ces éléments de définition, évoquons également la définition de [Groupe Structuration de Données \[1991\]](#) illustrée dans la Figure 3.1 : « pour un observateur O, un objet M est un modèle d'un objet A dans la mesure où O peut utiliser M pour répondre aux questions qui l'intéressent au sujet de A ».

Nous ne proposons donc pas une définition supplémentaire de ce qu'est un modèle. Retenons seulement les éléments indispensables à la bonne appréciation de ce que peut être un modèle :

- simplification (et par conséquent non-exhaustivité) de la réalité ou d'un système pour répondre à un objectif précis : le modèle répond à la place du système réel ;
- représentation abstraite via un formalisme et de la sémantique pour aider à communiquer entre plusieurs acteurs ;
- permet de masquer et de mettre en valeur certains éléments pour faciliter les analyses basées sur le modèle.

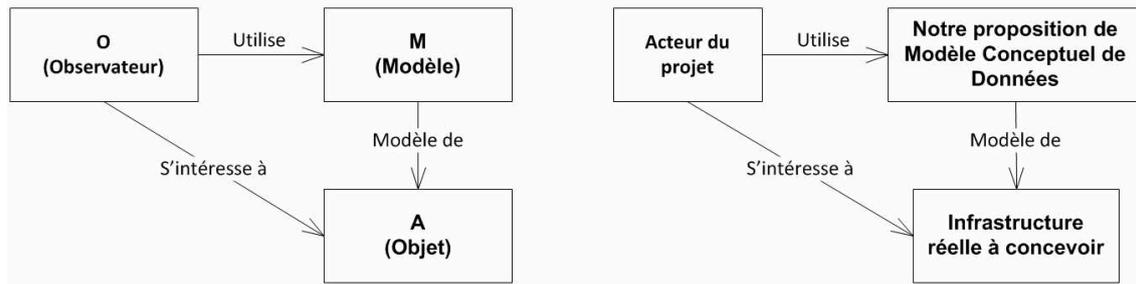


FIG. 3.1 – A gauche : relations entre un observateur, un modèle, et un objet (illustration des propos du Groupe Structuration de Données [1991]). A droite : adaptation de la figure de gauche à notre contexte de travail.

Donc modéliser consiste à capturer l'essentiel d'un problème dans un modèle. Il s'agit de l'objectif premier de ce travail de thèse : capturer dans un modèle conceptuel de données l'essentiel du problème de la structuration de l'information pour les projets d'infrastructure.

Nous insistons sur le fait que dans ces définitions, il s'agit de capturer l'« essentiel » d'un problème : la modélisation reste une simplification de la réalité comme le rappelle Kubicki dans sa définition de modèle qui ne représente pas tous les aspects de la réalité. La simplification de la réalité, indispensable à l'établissement d'un modèle, nécessite d'effectuer des choix dans ces simplifications, tout en ne s'éloignant pas trop de la réalité à modéliser. C'est-à-dire ne pas arriver à la « vache sphérique »¹. Ces choix sont arbitrés par les besoins pour lesquels la modélisation est réalisée ainsi que par le point de vue de l'acteur (ou des acteurs) qui construit le modèle. De ce fait, même si une modélisation reflète fidèlement la réalité, elle ne peut à elle seule être suffisante dans un processus de conception complexe comme évoqué en début de chapitre avec la citation de De Rosnay. Enfin, pour Parfouru [2008], la modélisation doit permettre une représentation des connaissances à la fois spécifique (contexte multi-domaines) et consensuelle (contexte multi points de vue). La validation de notre proposition de MCD (Modèle Conceptuel de Données) au travers des cas d'usages en quatrième partie servira justement à valider ces deux points.

Malgré le fait qu'il semble possible de définir ce qu'est un modèle de manière assez consensuelle et générale, il existe plusieurs types de modèles. Au travers de la bibliographie traitée ici ainsi que du travail réalisé avec des experts industriels, nous pouvons dégager trois types de modèles qui ont une définition mais surtout une conceptualisation bien différente. Ils appartiennent à des domaines métiers spécifiques et traduisent des manières de modéliser l'information. Ces trois types restent malgré leurs différences cohérents avec les définitions données ci-dessus.

Modèle de données : ou Modèle Conceptuel de Données (MCD) : il permet de représenter la structure d'un système d'information du point de vue des données et définit également les relations entre ces différentes données [Zoghlami, 2013]. Arthaud [2007] définit un modèle de données comme la description abstraite et logique d'une représentation des données dans une organisation métier ou un système d'information. Il est également défini comme étant conçu indépendamment de l'équipement et des logiciels utilisés pour la gestion des données [Québec, 2014].

Modèle de simulation (ou modèle mathématique) : il s'agit de modèles comportementaux : modélisation de comportements mécaniques, de diffusion de chaleur, de diffusion du bruit, de trafic, etc.

1. Pour rappel, la petite histoire est la suivante : la production laitière d'une ferme était si basse que le fermier envoya une lettre à l'université locale pour solliciter son assistance. Une équipe pluridisciplinaire, dirigée par un spécialiste de la physique théorique, effectua des études approfondies sur le terrain, puis rentra rédiger son rapport. Peu de temps après, le fermier le reçut, l'ouvrit et s'arrêta à la première phrase : « Soit une vache sphérique... »

Modèle d'objet : modèle de représentation d'un objet qui possède une existence spatiale, physique et une géométrie (notamment 2D ou 3D). Nous parlerons par la suite de *modélisation visuelle 3D* qui permet la visualisation des objets.

Nous venons d'évoquer les concepts de modèle et de modélisation. Le détail apporté pour établir ces définitions illustre le fait que modéliser n'est pas un tâche simple à réaliser. Il peut être pertinent de retenir une méthodologie qui facilite cette démarche conceptuelle de simplification de la réalité à étudier selon les besoins de ces études. C'est ce que nous décrivons dans la section qui suit.

3.2 Une démarche de modélisation en trois étapes

Pour arriver à proposer un modèle qui représente une réalité, un processus cognitif est indispensable : la modélisation. Bouzeghoub [2006] propose de décomposer la modélisation en trois « dimensions » (ces dernières peuvent également être considérées comme trois axes ou trois étapes puisqu'elles sont consécutives). Par conséquent, ce processus de modélisation concerne la définition du modèle de données, donc de la structuration de l'information, ainsi que de la représentation des objets du modèle (voir Figure 3.2).

1. L'axe de l'*univers du discours* qui est constitué de l'ensemble des objets et faits tangibles que l'on souhaite étudier.
2. L'axe des abstractions qui est constitué des artefacts créés lors de l'analyse de cet univers pour en simplifier la compréhension.
3. L'axe des formalismes qui est constitué des langages de représentation de ces artefacts et qui vont servir de support de communication et de raisonnement.

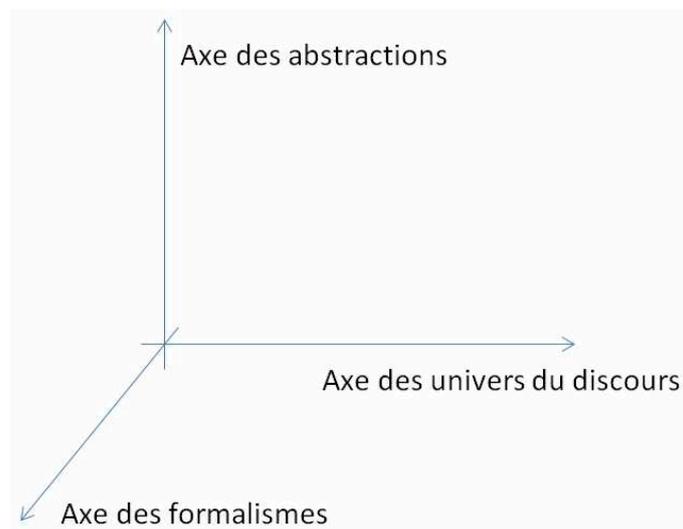


FIG. 3.2 – Illustration des trois axes de la modélisation d'après [Bouzeghoub, 2006].

Nous n'utilisons pas cette proposition dans son exacte définition. Voici ce que nous retenons dans notre contexte d'utilisation, plus large que la définition de modèles conceptuels de données.

1. L'axe de l'univers du discours : il est constitué des multiples perceptions que l'on peut avoir d'une organisation ou d'un système donné. Le choix de la perception est arbitraire, il dépend notamment de l'objectif visé et des acteurs impliqués. Il s'agit de sélectionner dans l'environnement existant (ou dans l'infrastructure à venir dans notre cas précis) les éléments pertinents à considérer.

Arthaud [2007] décrit l'univers du discours comme le domaine réel ou conceptuel auquel on s'intéresse, et les points de vue associés. Il se réfère aux termes sémantiques spécifiques au domaine concerné.

2. L'axe des abstractions : il a pour objectif de gérer la complexité du monde que l'on observe. Il est constitué de l'ensemble des objets que l'on peut créer pour classer ou décrire de manière simplifiée les objets et faits du réel perçu. Cet axe peut être organisé par paliers appelés *niveaux d'abstraction*. Chaque palier correspond à un centre d'intérêt ignorant certains artefacts ou réduisant la description d'autres. Il s'agit de naviguer entre plusieurs modélisations d'un même *univers du discours*. Par contre, nous n'allons pas considérer les trois niveaux classiques de la conception de bases de données (conceptuel, logique et physique) évoqués par Bouzeghoub. C'est sur ce point que notre définition diverge de celle proposée dans [Bouzeghoub, 2006]. Notre définition du niveau d'abstraction sera donnée en fin de troisième partie après avoir étudié d'autres concepts similaires. Ajoutons que cet axe doit également permettre de décrire les modélisations visuelles des éléments des modèles, abstractions de la réalité pertinente à étudier.

La manière dont sont définis ces univers du discours ainsi que les abstractions laisse à penser que ces deux étapes sont similaires à celles de la construction d'ontologies métier. Nous garderons tout de même ce terme d'univers du discours lorsque nous ferons référence à ces étapes de la modélisation.

3. L'axe des formalismes : il dépend des artefacts que l'on souhaite décrire et du niveau d'abstraction de leur description. Il est possible de choisir parmi différents formats ou langages existants (GML, IFC, SQL, UML, etc.) ou d'en définir un spécifique. Le langage doit permettre de répondre aux besoins induits par les analyses portées sur le modèle (axe des abstractions) et donc de représenter des contraintes, relations, comportements, etc.

Dans un processus de modélisation, l'abstraction est un principe important. Elle consiste à retenir uniquement les propriétés pertinentes d'un objet pour un problème précis [Debrauwer et Van der Heyde, 2005]. L'abstraction est donc intrinsèque à l'exercice de définition d'un MCD. Donc l'utilisation de modèles et d'objets implique une simplification du monde réel selon le point de vue de l'observateur. L'abstraction, et ce que nous appellerons plus tard le niveau d'abstraction, vont permettre de structurer les différentes approches et simplifications de nos modélisations du projet d'infrastructure.

En résumé, voici les étapes à considérer pour définir le modèle le plus pertinent selon les besoins d'un acteur et des regards qu'il porte sur le projet :

1. sélectionner les éléments à considérer du monde réel (ou de ce qui sera réel, c'est-à-dire les éléments de l'infrastructure en cours de conception) ;
2. simplifier cette sélection au travers d'abstractions ;
3. choisir un langage pour formaliser l'ensemble de ces informations.

Cette démarche de modélisation permet à partir d'un même univers du discours (sélection des éléments à modéliser) de créer plusieurs modélisations différentes, plusieurs niveaux d'abstraction. De plus, pour chaque acteur, il convient de suivre ces trois étapes de la modélisation.

Plus haut dans la section sur les ontologies, nous avons évoqué quelques différences entre une ontologie et un MCD. Voyons maintenant de manière pratique les liens entre les ontologies et cette démarche de modélisation en trois étapes.

Tout d'abord, la démarche de création d'ontologies décrites dans [Fléty, 2014] est similaire aux deux premières étapes de la modélisation citées ci-dessus. De plus, en se basant sur plusieurs travaux, Fléty écrit que les ontologies (ou *géo-ontologies*²) dépendent de l'échelle considérée (échelle au sens

2. Les *géo-ontologies* sont des ontologies modélisant un domaine particulier, en faisant appel à des données géographiques [Fléty, 2014].

de niveau d'observation et de modélisation des phénomènes étudiés) et du point de vue de l'utilisateur. Cela renvoie au *niveau d'abstraction* du deuxième axe de la modélisation. Enfin, Fléty explique qu'il n'est pas possible d'arriver à un réel consensus pour la définition du contenu d'une ontologie du fait de la composante intrinsèque sémantique d'une ontologie. Cette dernière remarque va dans le sens de ce que nous préconisons ci-dessus : il n'y a pas une seule ontologie du projet d'infrastructure. Plusieurs modélisation existent et les ontologies non formalisées de domaine permettent d'apporter une cohérence sémantique dans ces modélisations. Le bsDD de buildingSMART doit être complété dans cette optique (voir pour rappel la section 1.2.3 page 33). Les cas d'usage présentés dans la quatrième partie de ce mémoire visent à illustrer différents points du vue portés sur le projet et montrer les objets communs à différentes échelles au sens de niveaux d'abstraction. La Figure 3.3 reprend les éléments évoqués ci-dessus et les illustre.

Pour une exigence :

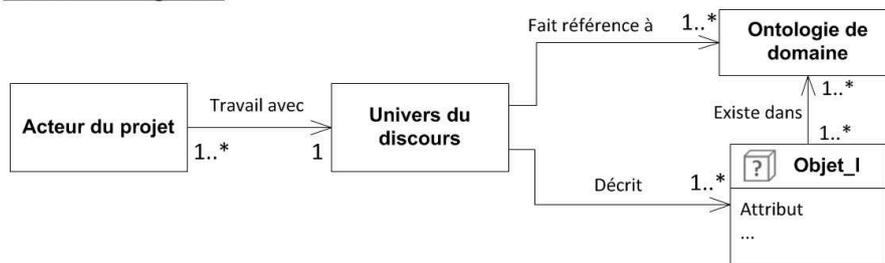


FIG. 3.3 – Relation entre les points de vue des acteurs, les ontologies de domaine et les *Objet_I* (voir le glossaire).

3.3 Définition d'éléments supports de l'information

Cette section vise à fournir les définitions clés pour ensuite faciliter la manipulation des concepts de ce travail. En effet, nous évoquons régulièrement les mots information, donnée, système d'information, modèle de données, objet ou ontologie. Ces termes demeurent liés et décrivent parfois des éléments communs. Voici ces définitions.

3.3.1 Donnés, informations et connaissances

Une donnée est une représentation d'une information sous une forme conventionnelle destinée à faciliter son traitement et sa communication [Conseil National de l'Information Géographique, 1994]. Le commentaire qui accompagne cette définition spécifie que la donnée serait plutôt la composante informatique sans référence à sa signification. D'après Wilson [2002], des données intégrées dans un contexte pertinent par rapport à un destinataire spécifique constitue de l'information. Pour Wilson, il est nécessaire de bien distinguer information et connaissance. Ajoutons que pour Picon [2013], l'information possède dans sa définition même un caractère événementiel, puisqu'elle correspond à « la sélection d'un état donné au sein d'états possibles ». Nous venons de citer trois sources, de domaines différents provenant respectivement de l'information géographique, de la gestion de connaissance et de la gestion de l'information dans la ville. Ces définitions sont cohérentes et distinguent bien donnée, information et connaissance. Il est donc possible d'échanger des données (on peut faire le parallèle avec le travail collaboratif, simple partage des données) ou de l'information lorsque ces données sont placées dans un contexte pertinent pour l'utilisateur de ces données, sous entendu correctement spécifiées et décrites par des méta-données. Ainsi, la structuration des données permet de les utiliser et de créer sur cette base, de l'information. La structuration de l'information permet une meilleure diffusion de la connaissance dans les processus de conception d'un projet. En effet, cette information est créée

pour servir un but. Pour [Morley et al. \[2008\]](#), « l'information est un symbole qui a une signification pour les acteurs de l'entreprise et qui peut se transformer en connaissance utile à l'accomplissement du travail individuel ou collectif ». Contrairement aux données et à l'information, la connaissance de chacun ne peut être réellement gérée (« manage ») et ce, seulement de manière imparfaite [[Wilson, 2002](#)]. C'est ce que l'on retrouve les propos de Godël [[Cassou-Noguès, 2007](#)] : la connaissance est relative à chacun, contrairement à l'information. C'est également ce qu'explique [Wilson \[2002\]](#) : seule l'information peut être échangée, mais pas la connaissance. Donc dans notre contexte, nous parlerons principalement d'informations. Un échange d'information nécessite forcément un échange de données. Mais le fait d'échanger de l'information signifie obtenir en complément de la donnée principale, les données qui la contextualisent et lui apportent de la valeur.

3.3.2 Système d'information

Plusieurs définitions de l'ouvrage de [Morley et al. \[2008\]](#) convergent pour définir un système d'information comme un ensemble organisé de ressources (matériel, logiciels, personnel, données et procédures) afin d'acquérir, traiter, stocker, communiquer des données, venant comme soutien à d'autres systèmes de travail. Cette définition s'applique à tous types de système d'information, notamment les systèmes d'information géographiques (SIG) qui nous concernent en particulier.

3.3.3 Interopérabilité

Nous travaillons à la structuration de l'information pour en faciliter l'échange. Si l'on procède à des échanges d'information, existe nécessairement la question de l'interopérabilité, déjà évoquée comme une problématique récurrente dans la mise en place du BIM. Pour définir l'interopérabilité, nous retenons dans un premier temps une définition tirée d'un contexte informatique. Il s'agit donc d'une définition au plus proche du sens premier de l'interopérabilité. Nous citons les éléments de définition suivants extraits de la thèse de [Chettaoui \[2011\]](#) :

- l'interopérabilité est la capacité que possèdent deux ou plusieurs systèmes ou composants à échanger des informations puis à exploiter les informations venant d'être échangées ;
- l'interopérabilité est également la capacité de deux entités différentes à travailler ensemble sans effort particulier de la part des utilisateurs de ces entités.

Le deuxième point signifie sans pertes ou transformations inopinées des informations échangées. Plusieurs types d'interopérabilité sont évoqués qui évoquent des problématiques et des solutions différentes (au niveau des formats d'échange, des modèles conceptuels ou des outils informatiques utilisés). Nous retrouvons ce découpage dans les travaux de [Obergrösser et Borrmann \[2012\]](#) qui rapportent les propositions de buildingSMART concernant des problématiques d'interopérabilité et de non uniformité du BIM. Trois « technologies » doivent être standardisées comme nous l'avons évoqué dans la section 1.2.3 page 33 :

1. la terminologie, au travers de la mise en cohérence des termes utilisés par chaque pays pour décrire les mêmes objets (bSDD par exemple) ;
2. le stockage numérique, au travers d'un format commun d'échanges de l'information (IFC ou CityGML par exemple) ;
3. les processus de travail, à l'aide des IDM notamment.

Concernant ce dernier point, comme pour les dictionnaires, chaque pays travaillant avec ses propres contrats, il ne semble pas possible aujourd'hui de définir des IDM totalement génériques, au même titre qu'il n'est pas possible de définir un dictionnaire générique. Il s'agit plutôt de mettre en relation les termes des dictionnaires de plusieurs pays (exemple des travaux CB-NL³). De même, dans les travaux

3. <http://public.cbnl.org/61> consulté le 11/03/2016.

en cours à l'AFNOR dans le cadre du groupe PPBIM⁴ et au niveau européen au CEN, l'interopérabilité est organisée par trois ensembles de normes, en cohérence directe avec les trois points précédents :

- Normes de dictionnaire de données pour spécifier la structure de données pour la définition des données-sémantique concepts (entité, propriété, classification ...) et les relations entre eux ;
- Normes du *modèle de données* pour spécifier la structure de données pour les entités, de la géométrie et des propriétés connexes, ainsi que la classification pour l'échange de modèles de données. Le modèle de données assure l'échange d'informations de base de l'objet ;
- Les normes de processus pour spécifier comment décrire les informations requises soutenir un processus de BIM donné.

D'après [Obergruesser et Borrmann, 2012], l'interopérabilité est aujourd'hui encore freinée par des processus traditionnellement basés sur du 2D et avec des ingénieries bien distinctes. Par conséquent, chaque modification apportée par un acteur nécessite un travail de reprise individuelle de la conception sans collaboration réelle. Rappelons tout de même que des outils travaillant directement en 3D existent depuis de nombreuses années. La question du 2D et du 3D n'est pas centrale dans l'application du BIM et dans les changements d'organisation des activités de conception qu'il engendre. Les problématiques d'interopérabilité apparaissent surtout avec l'échange d'informations sémantiques. Citons un exemple évoqué par Kolbe *et al.* [2005]. Les attributs des objets ont souvent des valeurs qui sont limitées à un certain nombre de valeurs discrètes comme le type de toit d'un bâtiment (plat, monopente, deux pans, quatre pans, en tourelle, avec ligne de bris, etc.). Si un tel attribut est de type chaîne de caractères, les fautes d'orthographe ou des noms différents pour la même notion entravent l'interopérabilité. Dans CityGML, ces attributs de classification sont définis comme des listes issues de dictionnaires. Une telle structure énumère toutes les valeurs possibles de l'attribut, assurant que le même nom est utilisé pour la même notion. Ainsi, pour toutes ces problématiques d'interopérabilité et de facilitation des échanges d'informations, les ontologies sont un outil indispensable. Elles permettent de structurer la sémantique en fonction des domaines métiers et de conserver la cohérence initiale de l'information au travers des échanges et éventuelles transformations qu'elle subit au cours de son cycle de vie.

3.4 Les Modèles Conceptuels de Données orientés objet

Nous définissons ici le terme objet et les différentes significations qu'il peut prendre dans ce mémoire. De manière générale, pour la définition de MCD, un objet est d'après Booch [1992] une entité tangible qui révèle un certain comportement bien défini. Les objets peuvent donc être des entités réelles ou bien une action, un comportement, etc. Un objet peut être :

- une chose palpable ou visible ;
- quelque chose qui peut être appréhendé intellectuellement ;
- quelque chose vers quoi la pensée ou l'action est dirigée.

Dans ce même contexte, pour être qualifié d'objet (concret ou abstrait), un élément doit satisfaire trois principes selon Morley *et al.* [2008] :

- *le principe de distinction* : chaque objet doit pouvoir être distingué des autres objets environnants, donc avoir une identité ;
- *le principe de permanence* : son évolution (de caractéristiques, de présence, d'absence) ne remet pas en cause son identité ; bien qu'au cours du temps un objet puisse se trouver dans plusieurs états, il ne peut être, à un instant donné, que dans un seul et unique état ;
- *le principe d'activité* : assimilable au comportement, l'objet se distingue par ce qu'il est, ce qu'il peut faire ou ce qu'on peut en faire.

4. Groupe de travail au niveau national pour la définition des propriétés, d'une méthodologie de création et de la gestion des propriétés dans un référentiel harmonisé pour le BIM.

Par conséquent, l'utilisation du concept d'objet implique donc une simplification du monde réel, de par l'intégration dans un modèle conceptuel et l'utilisation d'un niveau d'abstraction lié de la description des éléments considérés dans le modèle. Un objet peut donc représenter des éléments qu'on ne sait décrire plus en détail. Pour [Smith et Tockey \[1988\]](#) « un objet représente un élément individuel, identifiable, unité ou entité, soit réel soit abstrait, avec un rôle bien défini dans le domaine du problème ». Le grand intérêt de l'objet est la possibilité de le réutiliser dans des contextes différents, puisqu'il est décrit indépendamment de son environnement » [\[Morley et al., 2008\]](#). Par contre nous allons voir que sa représentation elle, est fonction de son environnement de modélisation.

Dans un contexte plus appliqué, le schéma conceptuel [ou MCD] traduit la catégorisation que l'on fait du monde réel [\[Ruas, 2004\]](#). Les standards IFC ou CityGML par exemple sont basés sur une conceptualisation orientée objet à des fins de modélisation du monde réel. Certains objets sont concrets et d'autres abstraits. Ensuite, dans un contexte BIM où l'on cherche à connecter des MCD provenant de plusieurs domaines métiers (géomatique et projet de construction dans notre cas) l'utilisation d'un langage orienté objet est maintenant incontournable. Les langages basés sur le modèle Entité-Association sont à proscrire, car leurs concepts sont trop pauvres pour modéliser la réalité des situations actuelles [\[Laplanche, 2002\]](#). Dans le projet Communic, le terme « objet » représente les composants réels qui ont été ou seront construits physiquement pour constituer l'ouvrage. Un objet occupe un volume défini, est positionné dans l'espace et a des caractéristiques qui lui sont propres. L'avantage de cette définition est son caractère réel dans l'ouvrage construit, qui permet de comprendre facilement de quoi l'on parle. Par conséquent, cette définition correspond plutôt à celle d'un composant et à ce que nous appellerons pour la suite de ce mémoire les *Objet_I* (nous ne distinguons pas le pluriel de ce nom pour faciliter la lecture), qui sont les objets réels représentant l'infrastructure en conception. Comme précisé dans le rapport [\[Communic L1, 2010\]](#), cette définition diffère de l'approche informatique du mot objet qui désigne d'une manière plus générale les éléments manipulés par les logiciels. Dans ce travail, nous utilisons finalement plusieurs types d'objets définis ci-dessous et présentés dans la Figure 3.4.

- Les *objets de notre proposition* qui représentent n'importe quelle classe d'objet (objet réel, abstrait, processus, acteur, etc.). Ils décrivent la proposition de MCD ainsi que les processus qui l'entourent. Il s'agit des objets au sens classique de la modélisation.
- Les *objets du projet de conception* (objets de ce que nous allons plus tard appeler *système pour faire*).
- Les objets de ce que nous allons appeler plus tard le *système à faire*, c'est à dire le sortant du projet de conception, créé par le *système pour faire*. Les *Objet_I* définis ci-dessus font partie de ce dernier groupe d'objets.

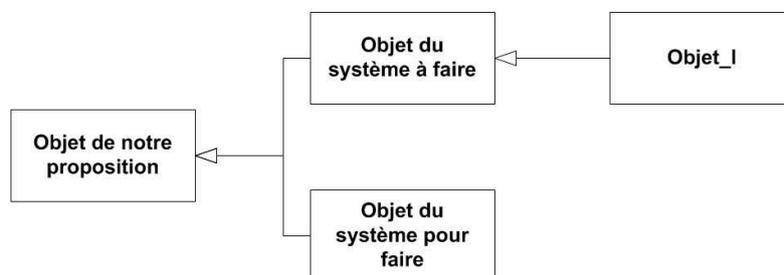


FIG. 3.4 – Illustration des relations entre les différents objets considérés dans notre travail.

Nous ne revenons pas ici sur les avantages d'une conception de MCD orienté objet. De nombreux travaux évoquent cette pertinence dans d'autres industries ainsi que pour le secteur de la construction ou pour la géomatique, notamment [\[Booch, 1992 ; Auzelle, 2009 ; Zoghiami, 2013 ; Laplanche, 2002 ;](#)

Parent *et al.*, 2006 ; Arthaud, 2007 ; Breunig et Zlatanova, 2011 ; Zignale, 2013]. D'autres arguments sont présentés évoqués [Groupe Structuration de Données, 1991]. Retenons notamment que le succès de l'approche objet n'est pas lié à un effet de mode : cette technique s'est révélée très efficace pour le développement des maquettes, aussi bien pour la partie modelleur que pour l'interface utilisateur [...]. Elle se révèle indispensable pour permettre le développement d'environnements avancés capables de supporter les fonctions d'aide à la conception [...], mais aussi l'ensemble des informations nécessaires tout au long du cycle de vie du bâtiment ». Elle a même été évoquée bien plus tôt par Simon [1982] : il parle a plusieurs reprises de CAO (« collaboration d'un humain et d'un ordinateur ») et de modélisation 3D. Il ajoute que les langages fonctionnels ou *orientés objet* illustrent quelques-unes des directions dans lesquelles une théorie de la représentation peut se forger.

Notons que le *modèle d'implantation* fait suite au MCD et décrit l'architecturation réelle des données sur leur support (fichier, base de donnée ou serveur). Pour les IFC, il existe par exemple le MCD décrit par BuildingSMART [2013], les fichiers IFC (en langage EXPRESS ou XML) et les modélisations visuelles des objets dans les outils spécifiques. Notre travail consiste principalement en la définition d'un MCD et des modélisations de ses objets constitutifs. Nous nous intéressons donc principalement aux deux premières étapes de la modélisation évoquées plus haut.

3.5 La généralisation de données

Le concept de généralisation revient à plusieurs reprises dans notre réflexion. Les éléments de définitions que nous donnons ci-dessous permettront de mieux appréhender notre analyse des concepts de *niveaux* décrite dans la troisième partie de ce travail. La représentation de l'espace géographique nécessite la création de données géographiques. « La généralisation est un processus de transformation de données géographiques utilisé pour produire des données qui répondent à des besoins précis » [Ruas, 1999]. En ce sens, la généralisation participe à notre réflexion de définition et de structuration de l'information pertinente pour répondre à des exigences dans le cadre d'un projet de conception.

La généralisation de données consiste en une adaptation des données qualitatives et quantitatives, par allègement du nombre de détail et simplification caractérisée des formes des tracés, en vue de l'établissement d'une carte répondant à des conditions déterminées, généralement une réduction d'échelle [Conseil National de l'Information Géographique, 1994]. D'après Ruas [1999], la généralisation est le processus utilisé pour dériver une représentation d'une autre représentation plus précise. Il ne s'agit pas d'un simple filtrage d'informations mais de la création d'une nouvelle représentation qui repose sur des opérations d'élimination, de regroupement et de modification. La généralisation consiste à créer une autre modélisation des objets selon une nouvelle logique, éventuellement au travers d'autres objets, en fonction d'analyses spécifiques pour d'autres échelles de travail. La généralisation est un processus de synthèse de l'information : une bonne généralisation est une généralisation qui a sélectionné les éléments porteurs de sens et qui leur a assigné une représentation pertinente selon le « produit à réaliser ». Il s'agit donc de diminuer la quantité d'informations, de la simplifier et de la rendre plus lisibles tout en conservant une fidélité par rapport à l'espace réel [et par rapport aux données qui ont servi de base à cette généralisation] [Ruas, 2004]. De fait, la description moins précise (résultat de la généralisation) n'est pas nécessairement contenue dans la description plus précise. C'est une partie de ce qui fait la complexité de la généralisation de données. Prélaz-Droux [1995] proposent une définition similaire et ajoutent que la généralisation répond à des besoins faisant référence soit à la perception, soit à l'échelle de visualisation de l'objet concerné. Dans le premier cas, elle permet d'amener la précision de la représentation géométrique de l'objet à un niveau correspondant à l'utilisation qui va en être faite. Dans le second, elle permet simplement de pouvoir représenter un objet à une échelle où il n'est normalement plus représentable. S'immiscent ici les concepts de « niveau d'abstraction » et de « niveau de détail » dont nous parlerons plus bas.

Pour comparaison avec le domaine de la conception, citons [Borrmann et al. \[2012\]](#) qui expliquent qu'« en cartographie, les cartes sont créées à partir d'abstractions d'objets du monde réel, alors qu'en génie civil le cycle de vie des objets commence à un niveau assez abstrait qui devient de plus en plus concret au fur et à mesure que la conception avance. » La modélisation plutôt statique utilisant la généralisation (domaine de la cartographie et de la géomatique) est opposée à la modélisation plus dynamique avec une optique de raffinement de l'information et une recherche de continuité entre les niveaux de détail (pour la conception d'infrastructures) [[Borrmann et al., 2014](#)]. Donc, pour modéliser l'avancée de la conception, nous ne devrions pas avoir besoin du concept de généralisation. Mais deux raisons nous prouvent le contraire :

1. nous avons besoins d'intégrer et d'utiliser dans notre processus de conception des données géographiques structurées avec une logique de généralisation ;
2. la modélisation dont nous avons besoin n'est pas toujours la plus détaillée disponible, dans le cas de coordination entre plusieurs métiers par exemple ; la généralisation est un moyen de faciliter la compréhension des données en fonction de l'objectif visé et ainsi optimiser l'efficacité de la réponse aux exigences du projet.
3. Les problématiques de généralisation sont en géomatique, fortement liées à la multi-représentation [[Mignard, 2012](#)], sujet qui nous concerne pleinement.

Notre travail ne traitera pas concrètement des règles de généralisation. Toutefois, ce concept est indispensable au traitement de notre problématique. De nombreux travaux existent sur ce sujet : pour plus d'informations sur ce concept, on peut notamment se référer aux travaux de [Ruas \[1999, 2004\]](#).

Les sections qui suivent décrivent les différents formalismes sélectionnés pour notre travail. Nous illustrons à la fin de ce chapitre comment peuvent être utilisés ces concepts et formalismes.

3.6 La notion de formalisme

Les formalismes plus que la rédaction littérale facilitent la compréhension mais soulèvent nécessairement la question de l'interprétation, bien plus présente que dans la rédaction littérale [[Cievansky et Sonntag, 2011](#)]. Les schémas [et les formalismes qui peuvent les décrire et les structurer] permettent d'exprimer un modèle conceptuel sous une forme simple, intuitivement compréhensible, mais qui nécessite d'être commentée [[Cievansky et Sonntag, 2011](#)]. Comme nous allons le voir, chaque formalisme est dédié à la représentation de faits ou d'objets spécifiques. Certains formalismes comme l'UML proposent un ensemble cohérent de plusieurs modélisation. Cela permet de modéliser différents aspects d'un même élément. Nous utilisons des formalismes pour deux raisons :

1. décrire notre proposition de MCD ;
2. décrire les outils et méthodes d'application sur projet de ce MCD.

Il existe de nombreux formalismes pour la modélisation conceptuelle de modèles de données. Nous présentons uniquement les plus pertinents pour notre contexte d'utilisation. Cette sélection s'est faite sur la base des travaux suivants : [[Laplanche, 2002](#) ; [Miralles, 2008](#) ; [Zoghiami, 2013](#)]. Nous allons voir ci-dessous pourquoi l'UML (Unified Modeling Language) a été retenu en priorité, comme formalisme principal pour la modélisation de notre MCD. Avec un esprit similaire à l'UML, on peut par exemple évoquer le modèle Entité-Association. Toutefois, ce type de langage utilise des concepts trop pauvres pour modéliser la réalité des situations actuelles [[Laplanche, 2002](#)]. Aujourd'hui, le standard industriel de modélisation objet est l'UML : comme l'indique [Hammoudi \[2010\]](#), il est désormais le langage de

spécification d'applications orientées objet le plus utilisé au monde. L'UML est un formalisme reconnu et éprouvé [Billen *et al.*, 2008] sous l'entière responsabilité de l'Object Management Group (OMG : groupement industriel dont l'objectif est de standardiser autour des technologies objet, afin de garantir l'interopérabilité des développements informatiques [Roques, 2014]. D'après [Laplanche, 2002], l'UML est bien sûr le formalisme le plus pertinent pour une modélisation objet. Avec un complément spatio-temporel comme PECEPTORY que nous détaillons ci-dessous, il devient également performant pour la définition de MCD orientés objets avec une forte composante géo-spatiale. Détaillons maintenant ces formalismes.

3.7 L'UML

Pour détailler l'UML, nous avons consulté et analysé plusieurs ouvrages ([Booch, 1992; Morley *et al.*, 2008; Charroux *et al.*, 2010; OMG, 2011; Roques, 2014; Audibert, 2014]). Le choix a été fait de ne retranscrire les définitions que d'un seul ouvrage à la fois pour éviter les confusions. Les citer toutes n'a pas d'intérêt puisqu'elles sont similaires. Pour une description exhaustive de l'UML on peut se référer à [Booch, 1992].

D'après Morley *et al.* [2008], l'UML peut aussi bien être utilisé au niveau conceptuel que logiciel (nous ne l'utilisons ici que pour la partie conceptuelle). L'UML se définit comme un langage de modélisation graphique et textuel destiné à comprendre et décrire des besoins, spécifier et documenter des systèmes, esquisser des architecture logicielles, concevoir des solutions et communiquer des points de vue [Roques, 2014]. L'UML est un langage de modélisation de données orienté objet basé sur l'utilisation de plusieurs types de diagrammes. Ils étaient au nombre de 9 en 2002 [Laplanche, 2002]. Il en existe maintenant 14 rassemblés dans la Figure 3.5. C'est donc un formalisme aux possibilités très larges avec 14 approches différentes pour la description d'un même système, biens qu'elles ne soient pas toujours toutes utilisées et que certaines couvrent des champs identiques. Ensuite, comme le fait remarquer Roques [2014], l'UML est très largement reconnu et complet mais souffre d'une difficulté « théorique » comme la nomme l'auteur : « assurer une bonne intégration et continuité entre les concepts des différents types de diagrammes, et éviter les redondances ». En effet, l'UML n'est qu'un langage de modélisation et non une méthode. De plus, certains diagrammes provoquent des recouvrements de description des mêmes objets : ils doivent donc être sélectionnés en connaissance de cause. En contre partie, cela fait de l'UML un outil utilisable de nombreuses manières et pour des projets de tous types de complexité [Roques, 2014].

L'utilisation de l'UML se fait au travers de plusieurs diagrammes qui permettent la modélisation de plusieurs types d'informations qui lient les objets du modèle. Tous les ouvrages relatifs à l'UML n'identifient pas exactement les mêmes types de diagrammes. Toutefois, tous font état de diagrammes dédiés à la description statique, structurelle d'un système et d'autres dédiés à la description dynamique d'un système [Booch, 1992; Laplanche, 2002; Libourel, 2002; Audibert, 2014]. Ensuite, les diagrammes les plus utiles dans la description d'un systèmes sont identifiés dans ces ouvrages comme étant : diagrammes de classes, d'objets, de composants (statiques, structurels) et diagrammes de cas d'utilisation et d'activité (dynamique, de comportement). Dans notre travail, les diagrammes d'implémentation du système décrit en UML ne sont pas étudiés. Nous ne sommes pas encore au stade de déploiement de notre proposition.

Enfin, comme le précisent Debrauwer et Van der Heyde [2005] dans leur ouvrage, l'UML est un support de modélisation mais ne constitue aucunement un guide méthodologique. L'UML possède l'avantage de décrire finement des objets tout en restant indépendant des technologies. C'est d'ailleurs pour cela qu'il est très souvent utilisé pour la description des modèles conceptuels de données pour les bases de données en géomatique. L'UML implique de faire des choix dans les classes d'objets, dans le positionnement des attributs dans les différentes classes, etc. Il est donc nécessaire de connaître les métiers des future utilisateurs ou de les inclure lors de la définition du MCD.

Les classes d'objet seront identifiées dans la suite du texte par une majuscule. Par exemple le *projet* signifie le projet de manière générale, dans son sens courant, et le *Projet* signifie l'élément spécifiquement défini dans ce mémoire et présent dans les différents diagrammes à venir. Les relations entre classes portent une mention qui donne une signification à cette relation. Il peut également exister une cardinalité qui spécifie la multiplicité de cette relation. (voir Figure 3.6).

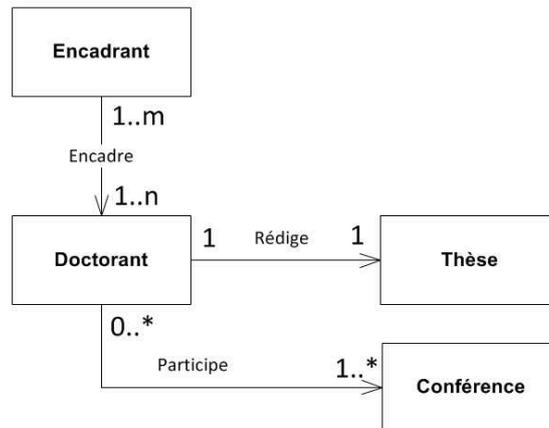


FIG. 3.6 – Illustration de quelques possibilités de cardinalité pour l'UML. Un Doctorant rédige (en général) une seule Thèse. Une Thèse n'est rédigée (de préférence!) que par un seul Doctorant (cette cardinalité 1 - 1 peut ne pas être spécifiée sur un diagramme UML). Un Doctorant participe à au moins une Conférence (1..*). Dans une Conférence il peut n'y avoir aucun Doctorant (0..*). Un Encadrant encadre un nombre fini de doctorant et un doctorant est encadré par un nombre fini d'Encadrant (relations 1..n et 1..m; $(n, m) \in \mathbb{N}$).

Une approche itérative éprouvée pour l'élaboration d'un diagramme de classe est proposée par Charroux *et al.* [2010]. Elle se décompose de quatre étapes :

1. identifier les classes à manipuler qui constituent le système à modéliser (de manière empirique, par la pratique et les connaissances métier d'experts ou par des ontologies métier par exemple) ;
2. associer ces classes en décrivant leurs relations de tous types (topologie, spécialisation...);
3. décrire les attributs de chaque classe ;
4. simplifier le diagramme (avec des encapsulations par exemple).

Des recommandations similaires sont faites dans le cadre de l'ingénierie des systèmes et de la gestion des exigences (voir partie 4.1).

L'UML présente certaines faiblesses dont voici quelques précisions.

- Pas de représentation des besoins spécifiques aux domaines d'application des modèles de l'UML (ce qui est normal puisque l'UML n'est qu'un langage générique) : donc il convient d'y ajouter des *profils* comme nous allons voir ci-dessous.
- L'UML n'est pas assez spécifique pour réussir à bien identifier les contraintes et exigences du projet (ce qui est normal pour la même raison que celle évoquée au point précédent). Cela oblige à utiliser d'autres formalismes et en tout cas des processus d'analyse complémentaires comme l'ingénierie système ou l'ingénierie des exigences.
- L'UML est jugé faible pour la description des composantes dynamiques d'un système, bien que certains diagramme dédiés à la composante dynamique existent [Kadima, 2005].

Nous avons donc recherché des compléments à l'UML pour répondre à nos besoins spécifiques de modélisation de l'information spatiale.

3.8 PERCEPTORY : un complément spatiotemporel à l'UML

De nombreux concepts véhiculés par le formalisme UML apparaissent comme pertinents pour la conception et l'analyse de systèmes d'information [Morley *et al.*, 2008]. Ces concepts sont, entre autres, ceux relevant de l'approche objet et ceux permettant une prise en compte des aspects dynamiques. Néanmoins il y a une nécessité d'adapter l'UML pour la modélisation de données spatiales. Ces adaptations doivent permettre de prendre en compte l'ensemble des spécificités des données spatiales dont la multi-représentation et la topologie.

Comme évoqué au début de cette section sur les formalismes de représentation et de modélisation, d'autres formalismes que l'UML existent. Certains sont spécifiquement dédiés à la modélisation spatiotemporelle comme CONGOO, POLLEN ou MADS⁵. Ils ont été étudiés et comparés dans [Parent *et al.*, 1997 ; Laplanche, 2002 ; Miralles, 2008 ; Zoghliami, 2013]. MADS est d'après ces auteurs le plus simple d'utilisation même pour des utilisateurs occasionnels. Bien que nous n'utilisions pas MADS par la suite dans ce travail, il est nécessaire de l'évoquer puisqu'il a constitué le socle préliminaire au développement de PERCEPTORY⁶ que nous détaillerons ci-dessous.

Bien que l'UML soit suffisamment générique et complet pour modéliser une multitude de systèmes de différents types, son utilisation dans certains contextes ne facilite pas nécessairement la compréhension rapide et univoque du système décrit. Il convient donc de lui ajouter une composante spécifique à nos besoins de modélisation de données spatio-temporelles. Nous proposons donc d'utiliser PERCEPTORY développé par Bédard [1999] et inspiré de MADS. Il s'agit d'un profil de l'UML⁷ [Bédard, 1999]. Ce formalisme permet d'identifier rapidement dans un MCD décrit en UML la géométrie et la dimensionnalité des objets. En effet, comme évoqué par Roques [2014], un autre avantage de l'UML réside dans le fait que tracer ou lire des diagrammes implique de travailler visuellement et d'exploiter le pouvoir que possède notre cerveau à saisir rapidement des symboles et des relations exprimées. PERCEPTORY fait profiter pleinement de cette compétence mentale. Ensuite, PERCEPTORY permet de distinguer la dimensionnalité de l'univers dans lequel se place l'objet et la dimensionnalité de l'objet lui-même. Cette différenciation de la dimension de l'objet et de la dimension de l'espace qui le contient existe également dans certaines normes de l'ISO : ainsi, notre proposition d'utiliser PERCEPTORY ne nous éloigne absolument pas d'une cohérence entre le travail présenté ici et les standards internationaux.

Le travail de [Larrivée *et al.*, 2006] évoque le fait qu'à l'époque (2002), un objet était considéré comme « en 3D » à partir du moment où il possédait des coordonnées dans les trois dimensions. Un point, objet à zéro dimension, était donc bien un objet 3D à partir du moment où il avait des coordonnées x , y et z . Il est indispensable, comme le rappellent les auteurs dans [Larrivée *et al.*, 2006] de différencier la dimension de l'objet et la dimension de l'espace qui comprend cet objet. Une définition plus exacte est évoquée par Larrivée *et al.* [2006], celle du site web Euclid's Elements [Euclid's Elements, 1996] : *A solid is that which has length, breadth, and depth*. La dimensionnalité du solide est donc bien relative à ses caractéristiques géométriques intrinsèques et non pas à son environnement. L'univers, ou espace, peut être quand à lui de 1, 2 ou 3 dimensions : cela dépend du nombre d'axes qui permettent de référencer les objets. Par exemple, pour un réseau routier, l'abscisse curviligne est un espace 1D. Les espaces avec un x et un y pour chaque objet sont dit 2D et ceux avec en plus une troisième composante sont dits 3D. D'après [Larrivée *et al.*, 2006] en CAO, la dimension d'un objet est plutôt définie selon

5. MADS : Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles. Modèle conceptuel développé suite au constat que les modèles conceptuels spatio-temporels de l'époque ne répondaient pas de manière satisfaisante aux besoins [Parent *et al.*, 1997]. Nous apportons plus de précision sur MADS en Annexe D.

6. PERCEPTORY est une solution pour modéliser conceptuellement une base de données géospatiales pour des fins d'application 3D : concepts théoriques, extension 3D pour l'UML et intégration de pictogrammes spatiaux et spatio-temporels [Larrivée *et al.*, 2006].

7. Un profil UML se compose d'un ensemble de techniques et de mécanismes permettant d'adapter UML à un domaine particulier [Hammoudi, 2010].

la dimension de l'espace qui l'englobe : une ligne droite serait un objet 1D et une ligne courbe un objet 2D puisque l'espace occupé par son rectangle englobant possède une largeur et une longueur. Le Tableau 3.1 illustre cette notion de dimensionalité utilisée dans PERCEPTORY. Le Tableau 3.2 montre l'intérêt de considérer la troisième dimension : dans un *Univers 3D*, le pictogramme de PERCEPTORY diffère selon l'objet alors qu'il était identique pour un *Univers 2D*.

TAB. 3.1 – Dimensionnalités possibles des objets selon celle de l'univers. La partie de droite illustre les combinaisons possibles entre pictogrammes (possibilités identiques pour un univers 3D). Cet ensemble de tableaux est une synthèse graphique et comprend des éléments extraits de [Larrivée et al., 2006; Zoghلامي, 2013; PictograF, 2016].

	Univers 2D	Univers 3D
0D (forme ponctuelle)		
1D (forme linéaire)		
2D (forme polygonale)		
3D (forme volumique)		
Forme compliquée		
Toutes formes confondues		
Forme inconnue		

Géométrie alternative		Les objets représentés possèdent une ou l'autre des géométries proposées
Géométrie multiple		Les objets représentés possèdent autant de géométries qu'il y'a de pictogrammes
Géométrie complexe		Objets composés en même temps de toutes les géométries proposées

TAB. 3.2 – Correspondance entre les pictogrammes des Univers 2D et 3D [Larrivée et al., 2006].

Objets de la réalité	regard		arbre		route		mur		terrain soccer		bâtiment	
Univers 2D												
Univers 3D												

Dans les diagrammes de classes ou d'objet, le pictogramme spatial est positionné à gauche du nom de la classe d'objets et à droite du nom de chaque attribut auquel il s'applique ou bien dans le nom de l'opération dans le cas de traitement relatif à la géométrie [Larrivée et al., 2006] (voir pour exemple la Figure 3.7). Cette figure illustre également les possibilités de combinaison de pictogrammes, outil utile notamment pour décrire la multi-représentation possible des objets manipulés. Enfin, on pourra se référer à la Figure 3.8 qui illustre parfaitement l'utilisation de PERCEPTORY dans une partie de modèle conceptuel en UML.

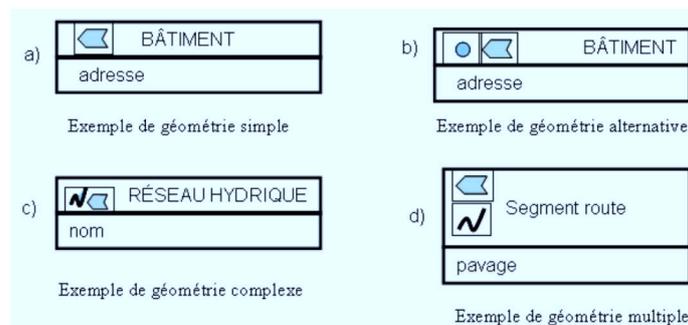


FIG. 3.7 – Exemples de combinaisons de pictogrammes avec PERCEPTORY, d'après [Zoghلامي, 2013].

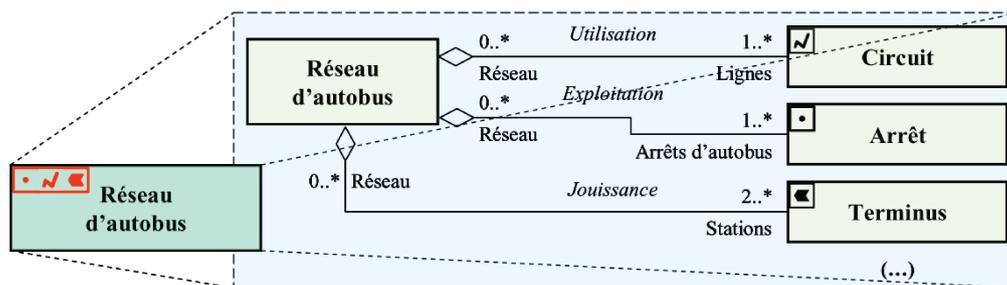


FIG. 3.8 – Modèle détaillé d'une « macro-entité » à spatialité complexe d'après [Miralles, 2008].

PERCEPTORY permet également de traiter la dimension temporelle des objets au moyen d'un pictogramme définissant une date et un second définissant une période. Cette possibilité n'est pas exploitée dans notre travail⁸.

Nous avons maintenant tous les éléments de modélisation nécessaires pour illustrer le processus de modélisation en trois étapes décrit en section 3.2. Nous proposons deux figures qui utilisent les formalismes décrits précédemment. La première (Figure 3.9) illustre de manière générale le contenu de chacune des trois étapes de la modélisation. Nous allons jusqu'au choix des standards mais il s'agit d'un cas fictif. Ainsi, nous pouvons également illustrer la place des ontologies dans notre réflexion. Cette démarche permet d'identifier des problématiques d'interopérabilité : par exemple, les données attributaires du Bâtiment sont séparées de l'objet et se retrouvent dans un document texte. Nous verrons dans la quatrième partie la formalisation de ces sujets de transformation de l'information qui l'altèrent. La seconde (Figure 3.10) traite deux points de vue. Nous n'avons considéré que certains éléments clés de ces deux types d'étude (étude acoustique et de qualité de l'air). Voici quelques remarques sur cet exemple.

- Nous sommes dans un contexte d'infrastructure routière.
- Les outils pour les calculs de répartition des pollutions atmosphériques ne peuvent intégrer des éléments volumiques trop complexes. Ainsi, les bâtiments considérés dans l'univers du discours deviennent de simples obstacles. Un ensemble de bâtiment est donc modélisé comme un unique obstacle dont la géométrie a été simplifiée.
- Les deux classes routes abordent un attribut « Trafic ». Nous les avons distinguées car les paramètres considérés sont différents selon qu'il s'agisse de l'étude acoustique ou de qualité de l'air. Nous avons dans ce cas pour un même objet, un attribut variable selon le contexte. De surcroît, cet attribut à le même intitulé dans les deux univers du discours. La définition d'ontologies de domaine s'impose donc pour permettre d'assurer une distinction sémantique entre ces deux attributs. Elle permet également de conserver l'information sur la transformation du groupe de bâtiment en un obstacle évoqué ci-dessus. Cette information sémantique est importante à considérer puisqu'il s'agit d'une forme de généralisation (concept que nous avons détaillé en section 3.5 page 72).

8. Le lecteur pourra se référer aux sites internet suivants pour des compléments d'information sur PERCEPTORY : pictograf.scg.ulaval.ca et <http://sirs.scg.ulaval.ca/perceptory/>, dernier accès 15/02/2016.

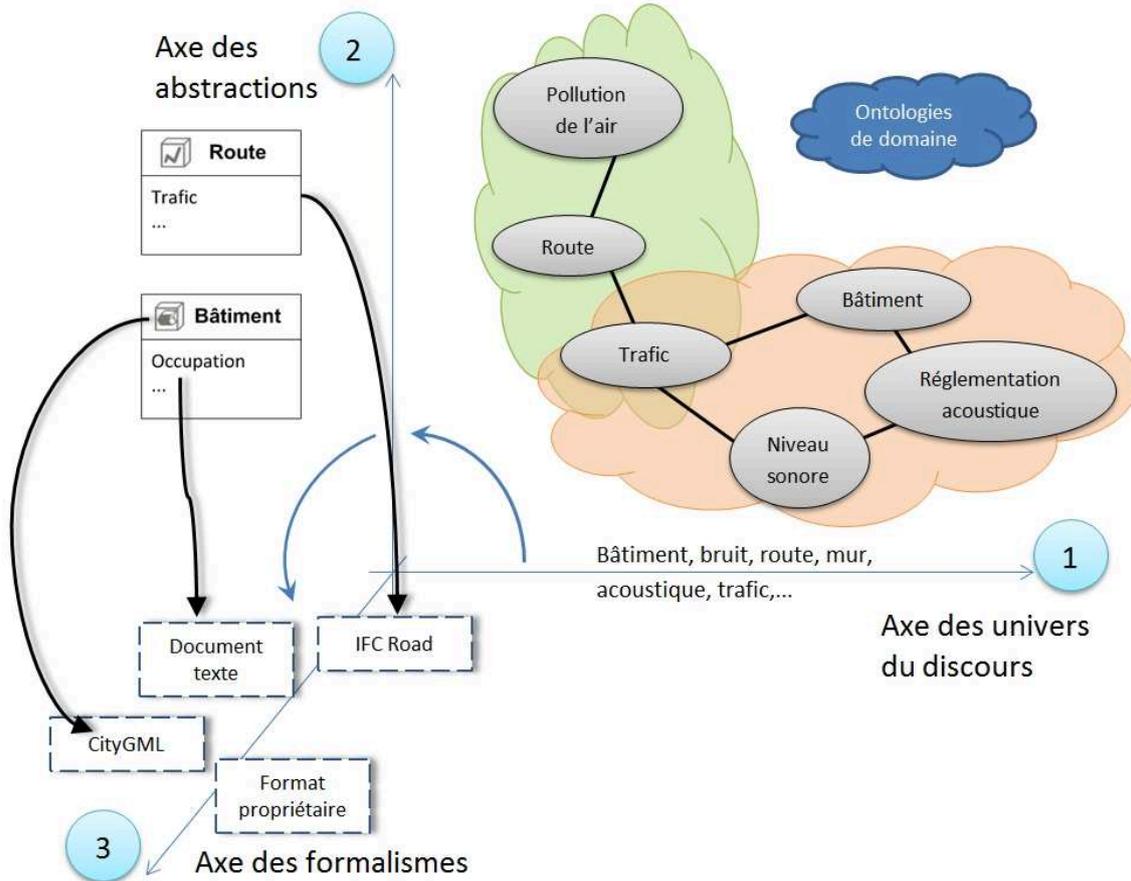


FIG. 3.9 – Illustration du contenu des trois axes de la modélisation évoqués en section 3.2 en considérant les ontologies. Il s'agit ici d'un cas fictif simplifié basé sur le cas des études acoustiques, détaillé en quatrième partie.

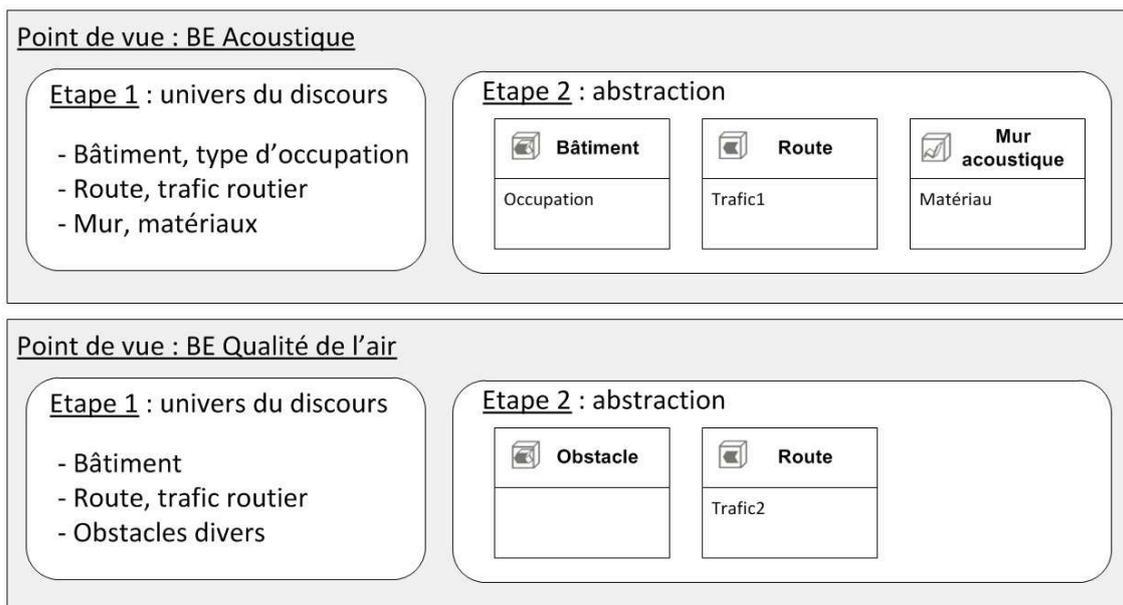


FIG. 3.10 – Deux exemples pour illustrer les deux premiers axes de la modélisation évoqués en section 3.2.

L'ingénierie système et la gestion des exigences : éléments d'application

Nous avons expliqué dans notre première partie la nécessité de décrire précisément les informations à échanger entre acteurs dans l'optique de répondre aux exigences du projet. Nous allons voir l'intérêt de s'intéresser à la structuration des exigences pour accomplir cette tâche, parallèlement à la structuration des objets représentant le projet. En explorant les pratiques dans d'autres industries, l'ingénierie des exigences émerge comme approche pour cette tâche. Toutefois, pour une meilleure applicabilité, l'étude de l'ingénierie système est nécessaire. Cette dernière permet de délimiter le système étudié et d'identifier ses interfaces avec son environnement. Ensuite seulement, nous utiliserons la démarche d'ingénierie des exigences pour identifier les besoins en échange d'informations pour répondre aux exigences, dans le cadre défini par l'ingénierie système.

4.1 L'ingénierie système

L'ingénierie système est née aux États-Unis en 1960 : ce sont bien les maîtres d'ouvrages *d'artefacts* complexes (aérospatial, aéronautique, développement de progiciels, réseaux de télécommunications et armement notamment) qui ont initié cette démarche et non pas les concepteurs. Elle s'est ensuite diffusée dans de nombreux secteurs industriels [Micaelli *et al.*, 2011], mais très peu semble-t-il dans le secteur de la construction. Comme nous l'évoquerons ci-dessous, l'ingénierie système ne se résume pas à un catalogue de recettes ou de diagrammes. Elle a pour concept central le *système*. L'accent est mis sur les interactions entre les entités nombreuses et hétérogènes. Les objets évoqués dans le processus de conception ne sont plus seulement les objets concrets, à construire : pour ce faire, le système étudié est modélisé comme des boîtes noires, afin d'identifier les interactions avec son environnement (ou contexte) ainsi que les exigences auxquelles cet objet doit répondre. De fait, cela permet également de porter l'application de différentes vues métiers sur chaque objet ou sur l'artefact à réaliser lui-même.

Nous ne traiterons pas toutes les subtilités de l'application de l'ingénierie système sur un projet de conception d'infrastructure. Nous utilisons cette approche plutôt comme une aide à la définition du problème et de ses limites. Les éléments développés dans ce chapitre seront mis en œuvre sur des cas pratiques dans le chapitre 7. L'ingénierie système permet ainsi de définir les points clés de notre réflexion. Elle apporte également des éléments méthodologiques à notre réflexion. Cette approche d'ingénierie encadre l'établissement d'une méthode de travail en vue de la structuration de l'information dans les projets de conception. Nous cherchons donc à établir un cadre méthodologique générique par l'ingénierie système (complétée par la suite par l'ingénierie des exigences) qui puisse servir les projets.

Pour cette partie de notre travail nous utilisons les ouvrages de l'AFIS¹, créée en 1999 et aujourd'hui antenne française du comité international INCOSE².

4.1.1 Définition de l'ingénierie système

Les premiers éléments de la définition de l'ingénierie système sont extraits des propos de D. Krob lors d'une conférence chez l'éditeur de logiciels Dassault Systeme [Krob, 2014a]. D. Krob travaille depuis de nombreuses années sur ce sujet à la fois en recherche et en lien avec des industriels. Lorsque le nombre d'interactions entre systèmes augmente, une approche en silos [telle qu'elle est aujourd'hui pratiquée dans le secteur de la construction] n'est plus possible. Des changements dans la démarche organisationnelle sont nécessaires comme la redéfinition des rôles et des responsabilités ou la mise en place d'outils informatiques structurants. L'ingénierie système s'intéresse au fonctionnement et dysfonctionnement des composants techniques (système à produire, intégration pour que les composants techniques fonctionnent ensemble) et du projet (coopération humaines, et outils collaboratifs) [Krob, 2014a]. Lorsque le nombre d'interfaces devient important (pour réaliser beaucoup de fonctions avec un même système), Krob évoque la relation non linéaire (évaluée de manière empirique) entre l'effort d'ingénierie à fournir que l'on note f et la complexité c . On aurait alors une relation de la forme :

$$f(c) = c^n \text{ avec } n > 1 \text{ (classiquement aux alentours de 1,5).}$$

L'ingénierie système permet de diminuer la valeur de cet exposant n et donc de limiter l'explosion de l'effort d'ingénierie à fournir lors de l'augmentation de la complexité du système. De plus, un avantage certain de cette approche par les systèmes est que la quasi-totalité des réalisations humaines sont analysables comme des systèmes : il ne s'agit que d'un choix de modélisation [Krob, 2014b]. Donc toute activité de conception peut s'approprier cette démarche pour modélisation et donc simplifier du système réel étudié afin de l'étudier. Cette approche est donc en parfaite adéquation avec la *conception abstraite* évoquée en section 1.2.4 page 36.

Diab [2014] s'inspire des travaux de D. Krob pour identifier les nouveaux concepts du génie urbain refondé. Cette nouvelle vision intègre pour la ville et l'urbain les concepts de système et de sous-système (techniques ou socio-techniques). Donnons tout d'abord la définition d'un système dans ce contexte :

Un système est constitué d'un ensemble d'éléments [ou sous-systèmes] dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné [Fiorèse et Meinadier, 2012]. Un sous-système est également un système.

Dans la modélisation et l'analyse du milieu urbain, la ville est considérée comme un système (complexe) et ses nombreux réseaux techniques sont au centre du fonctionnement et du développement urbain [Lhomme, 2012]. Ces réseaux portent des services et sont également considérés comme des systèmes. Comme nous l'avons décrit dans notre première partie (Figure 1.2 page 14), une infrastructure intègre de nombreux systèmes. Certains lui sont propres, d'autres sont en interaction avec l'existant ou la traversent seulement. Le concept de système permet une simplification de la réalité pertinente pour l'identification des interfaces entre systèmes, nombreuses pour les projets d'infrastructures routières en milieu urbain. Ce concept apporte également les notions de comportement d'entrée et de sortie ainsi que de comportement interne du système [Krob, 2014b]. Une infrastructure par exemple peut perturber le comportement interne du système *bassin versant* (perturbation des écoulements gravitaires) et perturbe donc également la sortie de ce système ; un nouveau projet peut également perturber l'entrée et la sortie du système d'assainissement ou du système viaire existants.

1. AFIS : Association Française d'Ingénierie Système.

2. INCOSE : International Committee on Systems Engineering.

Par contre, le fait de considérer la ville comme un système que l'on scinde en sous-systèmes ne dit rien sur la nature [et les relations] des sous-systèmes en question. La décomposition en sous-systèmes de l'urbain n'est pas unique : elle diffère selon le point de vue : sociale, économique, fonctionnel, etc. [Dupuy, 1984]. Nous verrons que même avec un point de vue uniquement technique, les décompositions et abstractions du projet d'infrastructure changent. Ensuite, il est précisé pour l'analyse systémique qu'un système composé de sous-systèmes ne peut être modélisé uniquement par la somme des modèles de ses sous-systèmes (*le tout est plus que la somme de ses parties*). Nous n'étudions pas en détail ce phénomène d'émergence. Par contre, nous concrétisons ce phénomène au travers de deux concepts que nous détaillons plus tard : le *niveau d'abstraction* et de la notion d'*Entité fonctionnel*.

Avec cette approche par les systèmes, notre contexte urbain ne paraît absolument pas éloigné de l'industrie manufacturière et nous encourage ainsi à nous approprier ses méthodes et concepts d'ingénierie système notamment. Cette dernière est d'ailleurs évoquée dans [Rochet et Peignot, 2013] pour la conception d'écosystèmes urbains. Par contre, des adaptations sont à prévoir : environ 10 % du temps du projet devraient être consacrés à l'abstraction et à la modélisation et non pas directement à la solution technique. D'après Krob [2014a], ce travail diminue les risques pendant le projet. L'utilisation de l'ingénierie système semble en ce sens intéressante pour une application au secteur de la construction mais rappelons que la structuration de notre marché et des contrats ne permet pas l'allocation de ce temps de préparation.

Donnons deux définitions complémentaires : elles permettent d'appréhender le paragraphe et la figure suivante :

Système à faire (ou « système réalisé » ou « produit » ou « système à réaliser ») : résultat ou produit du projet qui répond aux besoins.

Projet : (ou *système pour faire*) processus unique, qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans un but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques telles que les contraintes de délais, de coût et de ressources [NF ISO 10006, 1998]. Le terme *projet* désigne le processus de développement d'un système et plus spécifiquement ici d'une infrastructure. Un projet est également considéré par l'ingénierie système comme un système. Il est également appelé *système pour faire*.

Afin de bien identifier le rôle et la place de l'ingénierie système par rapport au projet et au *système à faire*, nous nous sommes inspirés d'un diagramme proposé par Fiorèse et Meinadier [2012] que nous avons simplifié. En effet, le contexte dans lequel nous travaillons diffère du contexte classique de l'ingénierie système qui est comme décrit précédemment, celui des industries complexes, comme l'aérospatial, ou avec une production en série de l'objet conçu. Dans notre travail, nous nous concentrons sur la partie conception du *système à faire* et ne traitons donc pas la partie planification du projet ou la partie des « produits contributeurs au cycle de vie du système » évoqués dans l'analyse de Fiorèse et Meinadier [2012] (voir Figure 4.1). Cette figure, bien que simple, illustre de deux manières la pertinence de l'utilisation de l'ingénierie système dans le travail de recherche présenté ici. Premièrement, l'ingénierie système fait partie des activités du projet. Ainsi, les processus imposés par l'ingénierie système s'ajoutent aux processus existants de management de projet et de management de l'information. Puisque nous avons défini préalablement le BIM comme un moyen de mettre en œuvre ces méthodes de l'ingénierie système, par la réorganisation des activités du projet, il est donc majoritairement composé de processus. Deuxièmement, l'ingénierie système permet de définir (d'une manière certes spécifique à cette approche) le *système à faire* et ses interfaces avec son environnement. L'ingénierie système intervient donc à deux niveaux dans un projet : sur les processus et sur la structuration de l'information. La cohérence de l'analyse de ces deux niveaux avec une approche commune (l'ingénierie système) implique nécessairement une cohérence entre le *système pour faire* et le *système à faire*. C'est pour cette raison

que l'utilisation de l'ingénierie système apparaît pertinente pour la définition de ce que nous appelons les BIM uses.

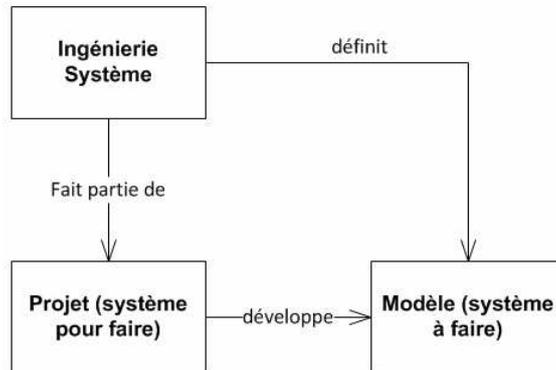


FIG. 4.1 – Intégration de l'ingénierie système dans un projet et impact sur les systèmes « à faire » et « pour faire » (inspiré de Fiorèse et Meinadier [2012]).

Plus qu'un outil visant à construire un produit physique, l'ingénierie système « cherche aussi à guider et à coordonner au mieux l'effort de toutes les disciplines concernées par la conception et la réalisation du produit » [Rochet, 2007]. L'ingénierie système a produit « un mode de pensée et une façon d'appréhender les projets par une approche structurée pour passer du besoin à la solution » [Fiorèse et Meinadier, 2012]. L'ingénierie système est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour analyser, concevoir et faire évoluer un système [Badreau et Boulanger, 2014]. L'ingénierie système apparaît par conséquent comme une contribution à la gestion de projet pour « aider à organiser l'organigramme des tâches en fonction de l'organigramme du produit » à réaliser [Luzeaux et Ruault, 2013]. Il s'agit donc bien de s'intéresser de manière conjointe au produit et aux processus pour créer ce produit. Cette approche définie par l'ingénierie système procure une vision holistique et une couverture interdisciplinaire d'un projet [Rochet, 2007]. C'est pour ces raisons que l'approche de l'ingénierie système nous intéresse dans l'optique de redéfinir l'organisation des activités de conception (partie processus des BIM uses) en relation avec la définition du contenu de ces BIM uses. L'ingénierie système apparaît également comme une aide certaine dans une réflexion sur la structuration de l'information dans un projet. On retrouve la considération de tout le cycle de vie du système étudié : l'ingénierie système (ainsi que l'ingénierie des exigences comme stipulé dans la section 4.2 ci-dessous) vise à couvrir l'ensemble du déroulement d'un projet, de l'expression des besoins au démantèlement du système produit. La Figure 4.2 explicite la place de l'ingénierie système dans un projet : les éléments non définis précédemment le sont ci-dessous.

Besoin : nécessité ou désir exprimé pour un utilisateur ou par toute partie prenante intéressée par l'utilisation et l'exploitation du système [Fiorèse et Meinadier, 2012].

Processus, méthodes et outils de l'ingénierie système : les activités du projet intègrent ces éléments, elles sont mises en œuvre pour en faire bénéficier le système réalisé. Ces éléments font partie du projet.

Cette Figure 4.2 indique que tout est système : non seulement le produit réalisé mais également les moyens ou processus pour y parvenir : ce postulat demeure fondateur de l'ingénierie système. Par conséquent, il convient dans une analyse basée sur une approche d'ingénierie système (ou d'ingénierie des exigences que nous verrons ci-dessous), de bien identifier et délimiter le système étudié. Nous verrons plus bas une manière de parvenir à définir le système étudié ainsi que ses limites et son environnement qui l'influencent au travers d'interfaces.

La difficulté majeure de l'utilisation de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences dans l'industrie est liée au fait que ces deux approches ne proposent pas de méthode ou de démarche

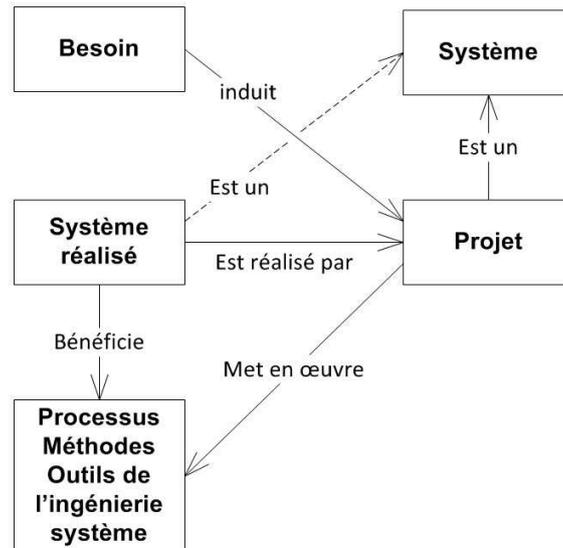


FIG. 4.2 – Lien entre le projet, son produit et les processus d'ingénierie système. Les autres types de processus (processus de conception, de management...) sont inclus dans l'élément Projet. Ce diagramme est extrait de [Fiorèse et Meinadier, 2012].

stricte puisque les champs d'application sont larges et touchent de nombreux domaines d'activité. Ces approches permettent par contre de poser le problème et de le comprendre avec une analyse structurée du système étudié. Comme pour la modélisation d'un modèle de données avec l'UML, la première étape consiste à sélectionner les outils d'analyse (ou diagrammes). De cette étape dépendent les résultats de modélisation et d'analyse qui vont ou non permettre d'aboutir à une compréhension pertinente du problème, au travers de points de vue adéquats.

Ensuite, en ingénierie système, deux approches complémentaires sont à pratiquer d'après Fiorèse et Meinadier [2012].

1. Dans un premier temps, le système est considéré comme inclus dans un environnement avec lequel il interagit. Le système est vu comme une *boîte noire*. On s'intéresse ainsi aux aspects structurels du système : finalité, environnement, interaction, interfaces externes, aspects temporels (cycle de vie du système) et aspects de pilotage du système.
2. Dans un second temps, le système est considéré comme constitué d'éléments en interaction. Le système est vu comme une *boîte blanche* dont la représentation précise la solution retenue pour répondre au besoin. On s'intéresse ainsi aux aspects structurels (organisation interne, composition, architecture et organisation des interfaces internes), aux aspects temporels (comportement interne et évolution fonctionnelle et structurelle) et aux aspects de pilotage (organisation interne du pilotage).

Le mélange ou la confusion de ces visions de boîte blanche et noir est préjudiciable à la fois pour le système à produire ainsi que pour le projet lui-même. Il s'agit d'un des problèmes fondamentaux de l'ingénierie système [Fiorèse et Meinadier, 2012]. A noter que cette vision en boîte noire est reprise par les *cas d'utilisation* de l'UML et qu'il s'agit également de la première étape d'analyse conseillée pour la modélisation d'un système en UML [Booch, 1992].

Dans un processus de conception, le Projet développe le *système à faire* qui devient à la fin du Projet le *produit*³ ou *système réalisé*. Par analogie pour le domaine de la construction, le système à

3. Aujourd'hui, il n'est pas courant d'appeler *produit* un ouvrage de génie civil ou une infrastructure. Toutefois, nous conservons ce terme afin de travailler d'utiliser les termes et concepts développés par l'ingénierie système pour d'autres industries que celle de la construction.

faire est l'infrastructure construite et en exploitation. Toutefois, le changement de paradigme actuel évoqué dans l'introduction de ce chapitre apporte une valeur à l'information qui fait également partie du produit final (voir la partie haute de la Figure 4.3). Le système étudié dans notre travail considère le « Projet » comme étant uniquement le projet en phase de conception⁴ : par conséquent, le *système à faire* n'est pas l'infrastructure mais seulement les modélisations de l'infrastructure ainsi que les données relatives aux activités de conception. Il s'agit donc de toute l'information de la conception, structurée, de manière à permettre la transmission de l'information aux étapes suivantes du projet complet dans une optique d'ingénierie concourante avec les acteurs de la phase de construction (voir la partie basse de la Figure 4.3). La continuité dans la définition et l'utilisation de l'information sur tout le cycle de vie de l'infrastructure est ce qui donne la valeur à l'information produit et fait qu'elle appartient bien au produit final du projet complet. Par ailleurs, c'est ainsi que se posent les plus importants problèmes d'interopérabilité et de continuité dans les échanges d'information et dans l'établissement des processus. Le terme « base de données » dans la Figure 4.3 évoque les différentes bases de données physiques utilisées dans le projet. A noter que chaque projet de la Figure 4.3 peut être organisé en plusieurs projets.

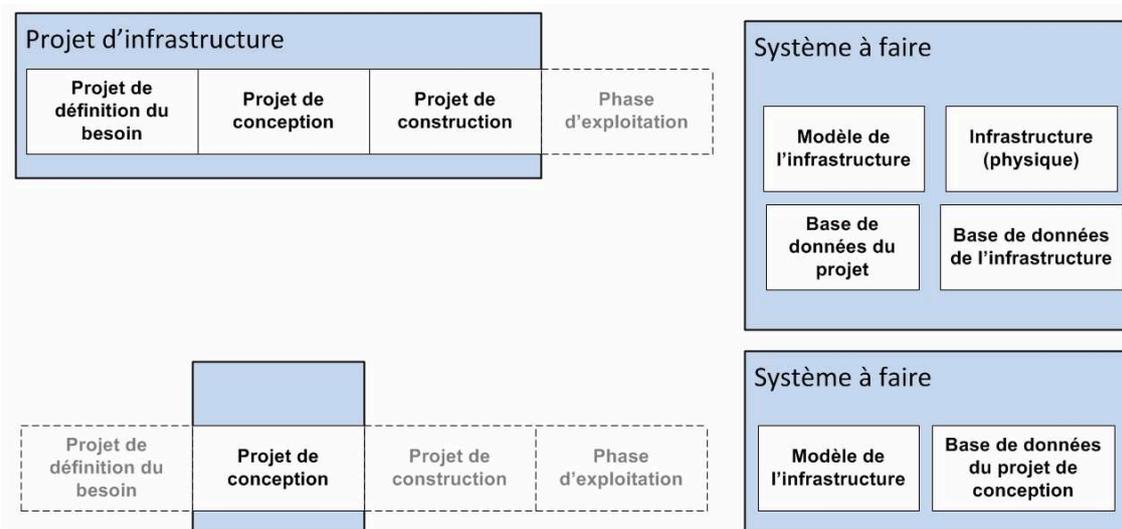


FIG. 4.3 – Différenciation du projet d'infrastructure et du projet de conception de l'infrastructure pour l'identification du système à faire. Cette représentation simplifiée ne considère pas le recouvrement possible de certaines phases selon le contrat. La considération de l'environnement contractuel (loi MOP, PPP, etc.) n'influence pas la définition du système à faire à ce niveau de représentation. Il reste identique alors que le système pour faire lui peut varier selon l'organisation contractuelle des acteurs.

Afin d'explicitier le lien entre les éléments de la Figure 4.3 (les différents *système à faire*) et notre proposition de MCD, nous proposons pour terminer cette partie sur l'ingénierie des exigences par la Figure 4.4. Le *système à faire* du projet de conception est le modèle du *système à faire* du projet d'infrastructure complet. Plus précisément, notre proposition de MCD ainsi que la méthode de définition du contenu des BIM uses permettent de structurer le *système à faire* du projet de conception.

4.1.2 Définition de la notion d'environnement

Nous avons plusieurs fois évoqué les termes de contexte et d'environnement du système. Ils ont une acception spécifique dans le contexte de l'ingénierie système. D'après les ouvrages consultés sur ce sujet [Rochet, 2007 ; Fiorèse et Meinadier, 2012 ; Luzeaux et Ruault, 2013 ; Badreau et Boulanger,

4. Cela n'empêche nullement de considérer les besoins des phases suivantes : construction et exploitation.

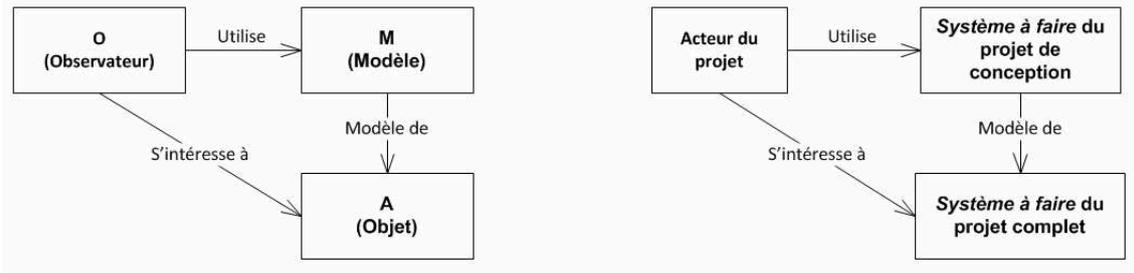


FIG. 4.4 – En se basant sur la définition des relations entre observateur, modèle et objet de la Figure 3.1 page 65, rappelée ici à gauche, cette figure présente en partie de droite la place des systèmes à faire évoqués ci-dessus en Figure 4.3 et illustrés en Figure 4.5.

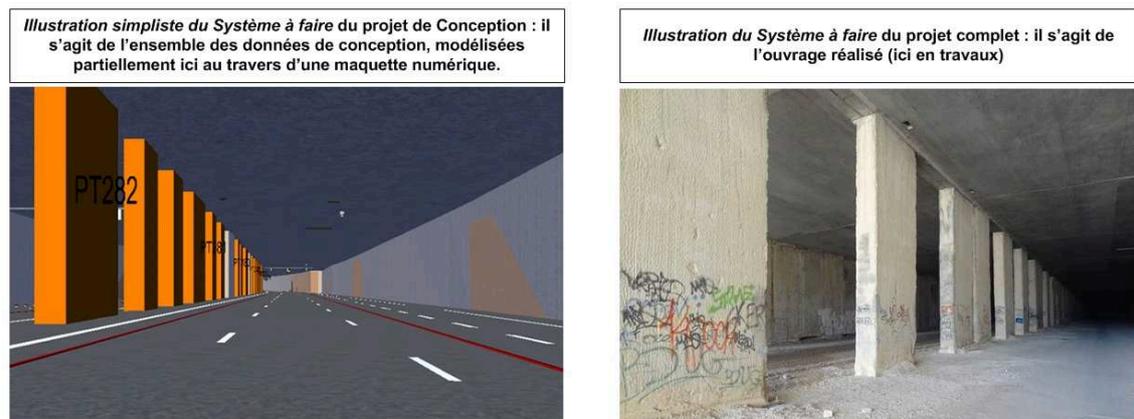


FIG. 4.5 – Illustration des systèmes à faire de la Figure 4.4.

2014], ces deux termes sont alternativement usités pour des significations similaires. Par exemple pour Badreau et Boulanger [2014], le contexte d'un système est tout ce qui est en interaction avec le système mais qui n'en fait pas partie. Tout ce qui ne fait ni partie du système, ni partie de son contexte fait partie de l'environnement non pertinent du système. Le *contexte* est ici plus directement lié au système que le terme d'*environnement*. En opposition, on trouve dans [Fiorèse et Meinadier, 2012] la définition suivante : « Adopter une approche système c'est garder à l'esprit que le système répond à une finalité, qu'il est plongé dans un environnement [...] ». Le problème de la première définition est qu'elle utilise à la fois le terme *contexte* et *environnement*. Cela peut porter à confusion et monopolise deux termes chargés de sens pour exprimer des concepts proches. Même si de manière générale dans les travaux traitant de la gestion de l'information le terme *contexte* est plus souvent utilisé [Parfouru, 2004 ; Halin et Kubicki, 2005 ; Kubicki, 2006 ; Zignale, 2013], nous retiendrons le terme d'*environnement* pour décrire l'environnement direct et indirect du système étudié. Nous nous inscrivons ainsi dans la continuité de Fiorèse et Meinadier et de l'AFIS⁵. Nous pourrions ainsi utiliser le terme de *contexte* dans son sens classique sans faire référence à l'ingénierie système. Rappelons également qu'H. Simon, figure importante de l'étude des systèmes, utilisait déjà le terme d'*environnement* dans son ouvrage *The sciences of the artificial* publié pour la première fois en 1969, aux débuts de l'ingénierie système.

Le premier avantage d'une distinction entre les environnements internes et externes dans l'étude d'un système adaptatif ou artificiel est de nous permettre de prédire son comportement à partir d'une connaissance de ses buts et de son environnement externe, et de quelques hypothèses minimales sur son environnement interne.

The sciences of the artificial, Simon 1982.

5. AIFS : Association Française d'Ingénierie Système

4.1.3 Processus d'utilisation des concepts et méthodes de l'ingénierie système

Nous étudions dans ce chapitre les méthodes et concepts de l'ingénierie système qui servent le projet et apportent de la qualité au *système à faire* de ce projet. Afin de définir le contenu des BIM uses, nous cherchons le moyen de relier ce qui doit être produit (le *système à faire*) avec les processus de conception (le *système pour faire*) pour répondre aux besoins qui induisent le projet. L'ingénierie système permet d'étudier le *système à faire* pour en définir sa structure et les interfaces avec son environnement direct. L'environnement peut ici aussi bien être l'environnement physique dans lequel l'infrastructure vas s'inscrire ou l'environnement des processus du projet et donc le BIM. Ainsi, nous verrons dans la synthèse de ce chapitre que le *système à faire* est soumis à des exigences liées à l'infrastructure elle-même et des exigences de processus. Ainsi, l'ingénierie système remplace le *système à faire* au centre des activités de conception pour une réponse plus efficace aux exigences et aux besoins du projet.

Le principal ouvrage utilisé pour définir notre méthode d'application de l'ingénierie systèmes, et ainsi répondre à notre problématique initiale de structuration et de gestion de l'information au travers des BIM uses, est celui de Fiorèse et Meinadier [2012, *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*]. Contrairement à l'ouvrage que nous utilisons pour la partie sur l'ingénierie des exigences (voir ci-dessous section 4.2), celui-ci ne vise pas à fournir une méthode d'application de l'ingénierie système. Cet ouvrage a plutôt une vocation « didactique pour susciter des interrogations et obliger son lecteur à adapter les éléments qu'il y trouve à son propre contexte d'utilisation de l'ingénierie système ». Cet ouvrage ainsi que le site internet de l'Association Française d'Ingénierie Système⁶ ont été utilisés dans l'optique d'en extraire les éléments et les moyens de décrire et d'analyser nos systèmes et leurs problématiques. Par ailleurs, ces éléments ont été adaptés à notre domaine d'activité différent sur bien des points des industries plus couramment utilisatrices de l'ingénierie système (industrie automobile, aérospatiale, défense, développement logiciel etc.). Listons les points clés de l'ingénierie système utilisés pour notre travail.

- Deux systèmes fortement liés : *système à faire* et *système pour faire*, respectivement système étudié et à concevoir, dont est considéré le cycle de vie, et système pour y arriver (système pour faire), composé principalement de processus et de méthodes.
- Vue externe et vue interne (concept de *boîte noire* et de *boîte blanche*) : ces deux approches sont indispensables dans l'ingénierie système : il est fondamental de simplifier dans un premier temps le système étudié en le limitant à ses seules interactions avec son environnement au travers d'interfaces afin de définir ses exigences d'utilisation.
- Différenciation du domaine du problème et du domaine de la solution.

4.2 L'ingénierie des exigences

L'ingénierie système et l'ingénierie des exigences étaient au départ deux domaines séparés même si l'ingénierie système traitait déjà partiellement des exigences. De plus, l'ingénierie des exigences se rencontrait le plus souvent pour des applications orientées logiciels. Elle s'applique maintenant de manière beaucoup plus large à bien d'autres métiers. Aujourd'hui, la gestion des exigences passe sous l'aile de l'ingénierie système. Cela donne une plus grande cohérence et lie plus intimement les systèmes et les exigences. Il devient plus aisé d'arriver aux exigences atomiques (indivisibles) et de les affecter à l'objet adéquat : l'allocation des exigences est fondamentale dans l'approche de l'ingénierie système [Badreau et Boulanger, 2014].

Les exigences sont le point d'entrée dans le processus de conception. Elles décrivent les objectifs et performances à atteindre. Dans leur ouvrage, Badreau et Boulanger [2014] reprennent les résultats d'un projet d'analyse des raisons d'échec et de réussite des projets (rapport CHAOS du Standish Group, régulièrement mis à jour depuis 1994). D'après ce rapport, une mauvaise mise en application de l'ingé-

6. AFIS, <https://www.afis.fr/pages/accueil.aspx>, dernier accès 15/02/2016.

nerie des exigences est responsable de 22 % des échecs et l'implication des utilisateurs conditionne de quasiment un tiers la réussite du projet. D'où l'importance de définir la structuration de l'information en considérant également les processus et les responsabilités des acteurs. Dans un projet d'infrastructure, ces éléments de processus sont décrits dans des documents d'organisation de la production, éventuellement contractuels, comme le BIM Execution Plan (BEP) qui décrit les éléments de mise en place du BIM sur le projet.

Ensuite, au travers de plusieurs références, [Badreau et Boulanger \[2014\]](#) justifient que le coût relatif de correction d'une erreur sur les exigences est exponentiel en fonction de l'avancée des phases de conception (identification des besoins, conception jusqu'à la maintenance). D'ailleurs, il s'agit de ce qui est indirectement évoqué dans la justification du BIM : la mise en place dès le début du projet d'un processus de conception globalisé entre les acteurs favorise la bonne compréhension des exigences du projet (en lien avec ce qu'exprime la [Figure 1.10](#) page 28 sur le paradoxe du processus de conception). Elle améliore par conséquent la qualité de la conception puisque, plus les modifications interviennent tard, plus elles sont coûteuses. Une bonne gestion des exigences permet de manière classique la maîtrise des coûts du projet, la diminution des risques, la diminution du temps de mise sur le marché, la satisfaction du client et des utilisateurs ou l'augmentation de la qualité du produit. L'ingénierie des exigences a vocation à optimiser la conception pour répondre au mieux aux besoins à couvrir, en limitant les besoins insatisfaits et les fonctions inutiles du système conçu [[Badreau et Boulanger, 2014](#)]. Travailler ainsi nous permet de cibler les besoins et de structurer le modèle conceptuel des objets (*système à faire*) de manière optimale. Ainsi, la première difficulté réside plus dans la définition de ces besoins que dans la réelle structuration du modèle de l'infrastructure.

L'ingénierie des exigences est une démarche méthodologique qui regroupe l'ensemble des activités permettant d'établir et de maintenir un référentiel d'exigences dans le temps [[Badreau et Boulanger, 2014](#)]. C'est la charnière entre l'analyse de la problématique à résoudre et la définition de la solution. Les définitions qui suivent sont nécessaires à la bonne compréhension des éléments de cette partie. Elles sont extraites de [[Badreau et Boulanger, 2014](#)] et cohérentes avec celles données au début de la section sur l'ingénierie système.

Partie prenante : est une personne physique ou morale qui a une influence ou un intérêt direct ou indirect dans un projet. Cette définition convient au terme d'acteur plus couramment utilisé dans notre industrie de la construction.

Acteur : est une personne physique ou un système distant qui interagit avec le système étudié pour atteindre un but précis.

Besoin : est une nécessité, un désir, un manque ou une insatisfaction éprouvés par un utilisateur.

Exigence : est un énoncé qui traduit un besoin ou des contraintes (techniques, coût, délais, etc.). Cet énoncé est rédigé dans un langage qui peut être naturel, mathématique, etc. [[AFIS, 2012](#)].

Système : un système est un ensemble de composants matériels, logiciels et humains qui coopèrent d'une manière organisée, dans un but d'atteindre un objectif commun.

Il existe plusieurs types d'exigences : [Badreau et Boulanger \[2014\]](#) distinguent celles relatives au produit développé et celles relatives aux processus : il s'agit par exemple des exigences de coût, de délai, de volume de vente, d'organisation [...]. **Ce sont des contraintes sur la manière de réaliser le système à faire que l'on trouve généralement décrites dans un document appelé Plan de Management de Projet (PMP)⁷. Comme nous l'avons illustré dans notre première partie, le livrable du projet ne doit plus être un ensemble de plans mais la base de données contenant les informations qui permettent de créer ces plans et de connaître l'historique de la conception. Ainsi, les processus qui permettent de créer cette information et d'en garantir la qualité**

7. PMP : Plan de Management de Projet. Document ou ensemble de documents qui décrivent comment le projet sera réalisé, suivi et piloté [ISO 21500 : Lignes directrices sur le management de projet] [[AFITEP, 2010](#)].

sont de plus en plus souvent contractuels. Ensuite, les exigences relatives au produit développé se décomposent en deux catégories : les exigences fonctionnelles (liées aux fonctionnalités du système, répondant à la question « Que fait le système ? ») et les exigences non fonctionnelles (liées à la manière dont se comporte le système, répondant à la question « Comment se comporte le système ? »). Elles traitent des performances du système ou de ses composants (voir la partie gauche de la Figure 4.6). Les exigences fonctionnelles sont dédiées à la description grossière du projet, avec un niveau d'abstraction plus important que les exigences non fonctionnelles, relatives elles à des composants ou organes du projet. S'ajoute à cela une nuance sur la manière dont elles sont définies. En effet, selon la phase du projet, certaines exigences peuvent ne pas être encore parfaitement définies ou peuvent évoluer. D'autres exigences peuvent être parfaitement définies, avec des valeurs chiffrées de performance comme pour la sécurité des usagers d'une route par exemple, avec les performances des glissières de sécurité. Par contre, la réponse à cette exigence est beaucoup plus floue et sujette à discussion puisqu'elle doit tenir compte des objets constituant l'environnement physique proche de cette glissière. C'est ensuite un expert qui évalue cette réponse, par rapport à cet environnement et à l'exigence de performance. Ce type d'exigence fait donc appel à une multitude d'informations de différents types. Notre proposition de méthodologie d'établissement du contenu des BIM uses vise à établir les liens, nombreux, entre objets, systèmes et exigences, et qui structurent notre MCD de projet. Suite à notre étude de l'ingénierie système et au travers des cas d'usages de notre quatrième partie, l'ingénierie système est selon nous un moyen efficace pour définir ces liens.

Une autre répartition possible des exigences est celle décrite dans [Krob, 2009 ; Doufene et al., 2014]. Elle est plutôt utilisée pour l'architecture des systèmes complexes ou dans le développement logiciel. Nous verrons par la suite qu'elle reste tout à fait pertinente pour une application au secteur de la construction. Elle est en fait complémentaire à la précédente différentiation qui vient d'être décrite. Cette répartition considère trois visions illustrées dans la partie droite de la Figure 4.6 :

1. la vision *opérationnelle* qui a pour but de définir le pourquoi du système, autrement dit de préciser la mission du système et ce à quoi sert le système ;
2. la vision *fonctionnelle* qui a pour objectif d'explicitier le fonctionnement logique du système, c'est-à-dire ce qu'il fait indépendamment de la façon dont on le réalisera ;
3. la vision *organique* qui explique la façon dont le système est concrètement réalisé, c'est-à-dire l'organisation et la dynamique de ses composants matériels, logiciels et humains (les objets des IFC peuvent par exemple porter certaines des exigences organiques).

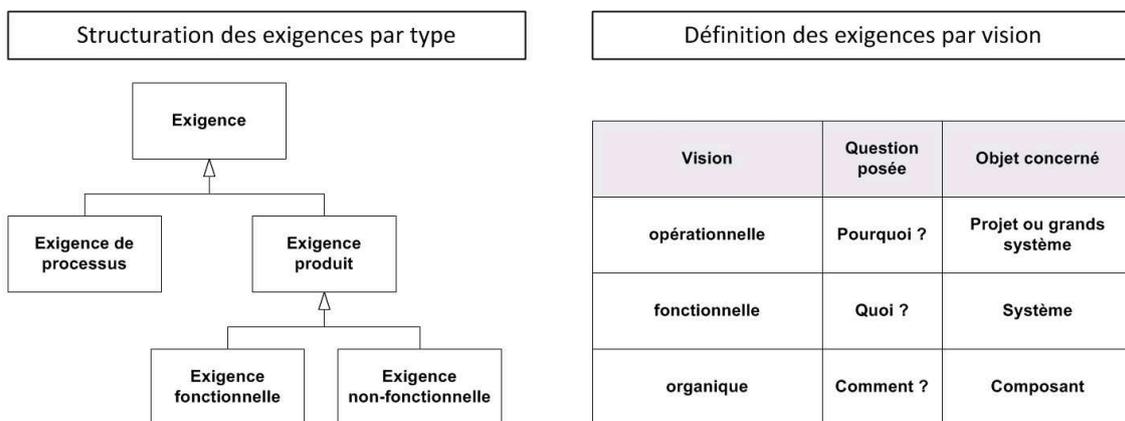


FIG. 4.6 – Confrontation entre deux manières d'identifier des exigences : partie de gauche basée sur [Badreau et Boulanger, 2014] (définition des types d'exigences) et partie de droite basée sur [Krob, 2009] (visions portées sur un système (à faire ou pour faire) et qui influence la structuration des exigences).

Nous distinguons donc deux manières d'approcher la structuration des exigences qui sont complémentaires. La première se base sur le type d'exigence, pour bien distinguer celles relatives au *système à faire* et celles relatives au *système pour faire*. La seconde établit une structuration des exigences selon les visions portées sur le système étudié (partie de droite de la Figure 4.6). Cette structuration est à développer en parallèle des visions portées sur le *système à faire* [Krob, 2014b]. La structuration par type sert à la création du référentiel d'exigence car elle facilite le travail d'identification et de définition des nombreuses exigences du projet. Nous allons plutôt nous concentrer sur la définition des exigences par vision, puisqu'elle aura des conséquences sur la ou les décompositions en objets du projet. En lien avec la Figure 4.7, la hiérarchisation des exigences permet :

- de répercuter des modifications d'une exigences (E1.3) sur d'autres par hérédité (E1.3.1),
- de connaître l'impact de la modification d'une exigence (E1.3.1) sur les objets (O1.2.2 et O1.1),
- de connaître les exigences à réévaluer (E1.3) lors de la modification d'un objets (O1.1) pour des raisons non liées aux exigences de cette vision par exemple.

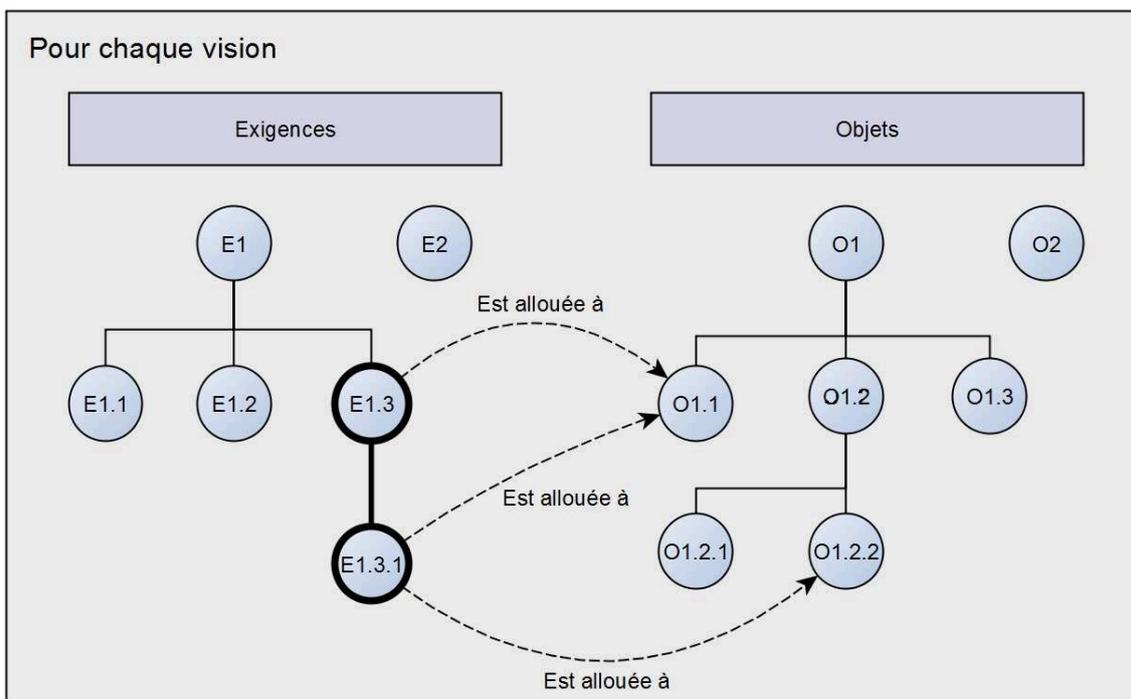


FIG. 4.7 – Exemple de relations entre la structuration des exigences et des objets sur une seule vision portée sur le projet.

La modélisation des exigences, bien que nécessitant des compétences et connaissances spécifiques ainsi que des outils et des modèles, procure des avantages indéniables d'après Badreau et Boulanger [2014] :

- meilleure compréhension du problème et de la solution ;
- meilleure analyse du problème et de la solution ;
- réduction de la complexité du domaine grâce à l'abstraction ;
- meilleure communication avec les parties prenantes ;
- pose les bases d'un raisonnement sur un problème, une solution ;
- amélioration de la cohérence et de la complétude des exigences.

Voici quelques exemples d'exigences dans le contexte d'un projet autoroutier (elles sont extraites des documents réglementaires : dans ces documents les exigences sont parfois posées de manière inter-

rogative).

- Les vitesses réglementaires pour chaque section sont-elles adaptées ?
- La superficie et la capacité de l'aire de service est-elle cohérente avec le niveau d'aménagement ou sa fonction ? (Cette exigence par exemple nécessite une déclinaison en sous-exigences car elle n'est pas assez précise ni vérifiable.)
- La règle d'implantation des niches et issues est-elle respectée ? Cette exigence implique un contrôle de plusieurs points de la réglementation incendie en tunnels. Elle doit donc également être déclinée en plusieurs autres exigences.

Les exigences sont nombreuses et plus ou moins détaillées. Elles sont également de type bien différent comme nous venons de le voir. Il est impossible de gérer les exigences sans les structurer et les catégoriser. Il existe de nombreuses règles et bonnes pratiques concernant l'expression des exigences. L'ouvrage de l'AFIS [2012] par exemple donne des pistes pour ce travail. Nous détaillons en Annexe E les étapes d'application de l'ingénierie des exigences que nous avons utilisées pour détailler les exigences à traiter dans nos expérimentations. Évoquons ici seulement le fait qu'une exigence doit être claire, précise, de préférence formalisable et surtout, vérifiable. La définition des exigences et leur gestion constitue un pan entier de recherche et de travaux industriels. Dans un contexte de gestion des exigences, l'utilisation du langage naturel est et restera comme l'écrit [Badreau et Boulanger \[2014\]](#) le principal vecteur de communication des exigences d'un système ou d'un logiciel, notamment du fait des avantages qu'il procure : universel et flexible, facilite la compréhension mutuelle sans formation ou expérience particulière et ce, sans outillage spécifique [[Badreau et Boulanger, 2014](#)]. Ces points sont tout de même à nuancer selon les contextes car comme le montrent tous les exemples donnés dans l'ouvrage de l'AFIS [2012], la capacité à rédiger correctement des exigences en langage naturel sans connaissances particulières du domaine n'est pas si évident que les propos précédents peuvent laisser paraître. Illustrons nos propos par quelques exemples applicatifs sur un projet d'infrastructure urbaine.

La réponse aux exigences est itérative et selon l'avancée de la conception, pour une même exigence, la précision dans la réponse croît. Par exemple, concernant le plan de signalisation directionnelle⁸, au début des études, seul le plan dans son ensemble est contrôlé. Puis, selon l'avancée de la conception, la conformité de ce système de signalisation directionnelle est contrôlée avec de plus en plus de rigueur alors que ce qui dirige la conception, les exigences (principalement réglementaires dans ce cas), sont fixes. Il existe donc des nuances dans le contrôle des réponses aux exigences. Nous verrons plusieurs cas explicites dans l'exploitation des BIM usés en quatrième partie. Ensuite, dans le cadre de la loi MOP par exemple, les exigences auxquelles il faut répondre sont de plus en plus précises avec l'avancée des phases du projet. Le niveau d'information fourni par la conception pour y répondre doit donc croître de manière similaire. Prenons l'exemple d'une passerelle. D'après [[Sétra, 2008](#)], le programme du projet doit indiquer les modes d'utilisation envisagés (piéton, cycliste, équestre) et répondre aux exigences spécifiques à ces modes (réglementation notamment). Ensuite, avec l'avancée de la conception, les exigences se précisent : largeur selon l'utilisation ou confort des usagers par exemple. A cela peut également s'ajouter la superposition d'exigences de conception et d'exigences de construction qui peuvent être contradictoire, lors de Partenariat Public Privé (PPP) notamment. Nous pouvons citer par exemple de possibles contradictions entre exigences de performances (ouvrage en service) avec des exigences de construction liées aux besoins de limiter l'impact du chantier (pollution visuelle ou sonore notamment pour des chantiers en zone urbaine). Des solutions préfabriquées pour certains ouvrages d'art peuvent être préférées plutôt. Ou encore une variabilité de la traduction selon la phase. L'exemple d'une exigence de gabarit libre en tunnel illustre parfaitement ce propos : la hauteur libre est définie par la réglementation (*hauteur réglementaire* dans la Figure 4.8 à gauche). Au niveau PRO, les accéléra-

8. Plan représentant l'implantation des panneaux dédiés à l'affichage des directions.

teurs⁹ sont implantés verticalement à partir de la chaussée en respectant la hauteur réglementaire qui est fixe. L'exigence de gabarit est donc contrôlée *via* les clashes¹⁰ entre les accélérateurs et l'intrados de la couverture du tunnel. En phase EXE, on s'intéresse à la construction du projet et à la mise en place des équipements. Par conséquent, l'exigence de gabarit (la *hauteur évaluée* doit être supérieure ou égale à la *hauteur réglementaire*) est mesurée après implantation de l'accélérateur (le modèle de cet objet est celui du catalogue constructeur par exemple, pour répondre aux exigences de sécurité incendie et de ventilation) selon les dispositions techniques réglementaires. Dans les deux cas de la Figure 4.8, l'exigence n'est pas respectée (clash en phase PRO et hauteur libre inférieure à la hauteur réglementaire). Il en est de même pour de nombreux autres équipements ou panneaux de signalisation verticale notamment. Ainsi, selon la phase, une même exigence est évaluée de manière différente.

La structuration des exigences est indispensable pour leur gestion ainsi que pour décider des compromis lors d'incompatibilités entre exigences (application de plusieurs exigences sur un même objet, potentiellement de plusieurs niveaux d'abstraction ou visions). La répercussion de la modification d'une exigence ne va pas nécessairement des exigences opérationnelles vers les exigences organiques. Par exemple, si la géométrie d'une plateforme est trop contrainte par son environnement et ne peut répondre à la réglementation (exigence fonctionnelle, voire organique puisque appliquée à l'objet *plateforme*), la vitesse limite de circulation peut être diminuée (exigence opérationnelle).

En lien avec les précédents éléments sur l'ingénierie des exigences et la Figure 1.10 page 28 sur le paradoxe du processus de conception, nous faisons les constats suivants :

- une réflexion de fond sur les besoins est nécessaire en amont, d'autant plus que le programme engage la majorité du coût d'un projet ;
- la structuration des besoins et leur rapport aux exigences qui en découlent est indispensable pour connaître et mieux gérer les conséquences des choix de conception ;
- l'effort de création de l'information doit être réalisé plus dans les phases amont et la conservation de ce capital informationnel, de manière exploitable, est cruciale.

Le dernier point apparaît régulièrement dans les préconisations pour un « BIM efficace ». Toujours en lien avec le *paradoxe du processus de conception* illustré en Figure 1.10 page 28, un effort plus important de création de l'information en amont permet de prendre des décisions en se basant sur de l'information plus fiable et donc avec des risques mieux contrôlés. Cette information permet ensuite d'alimenter les BIM uses pour contrôler au plus tôt la réponse de la conception aux exigences. Comme les BIM uses traitent à la fois des exigences et de l'information de conception (*système à faire*), il est indispensable que notre proposition de MCD apporte une cohérence entre la structuration des exigences et la structuration de l'information. Nous traiterons en détail ce point dans la troisième partie de ce mémoire. Nous verrons également comment l'ingénierie des exigences permet d'affiner le travail de modélisation en trois étapes et garantit la considération des éléments pertinents en fonction de chaque exigence à traiter. Cela correspond à la définition du contenu des BIM uses.

Nous avons présenté ici une procédure rationnelle de définition des exigences. Toutefois, comme le précise Moine [2006] : « Si un équipement est localisé précisément à tel endroit, ce n'est pas forcément en relation avec une loi d'organisation spatiale reconnue par la communauté scientifique, mais tout simplement parce qu'un acteur politique influence, ou plus raisonnablement un groupe d'acteurs, l'a souhaité en dehors de toute « rationalité » scientifique ». Ainsi, une difficulté supplémentaire s'ajoute

9. Accélérateur : ventilateurs fixés à la couverture du tunnel pour la circulation de l'air intérieur.

10. Un clash est souvent considéré comme une interaction volumique entre deux objets. Il existe d'autres types de clashes : une non continuité, physique ou topologie, ou une distance minimale non respectée entre deux objets sont également des clashes.

à la réflexion de la structuration du modèle représentatif de l'infrastructure. Elle est liée au flou apporté par l'humain et ses comportements et décisions qui peuvent parfois sortir d'une réflexion rationnelle ou plus simplement technique et fonctionnelle.

De nombreuses questions se posent sur la gestion des exigences. Comment gérer l'hérédité des exigences? Est-il concrètement possible de lier chaque objet avec les exigences auxquelles il se rapporte? Est-ce efficient dans la structuration de l'information? Comment gérer l'hérédité des exigences entre les différentes vues du projet et les décompositions du projet en objets, espaces ou ouvrages fonctionnels (nous verrons le détail de ces trois autres décompositions dans les prochains chapitre)? Comme déjà évoqué ci-dessus, dans la suite de notre travail, nous n'allons pas nous concentrer sur la manière dont devront être gérées les exigences. Nous allons par contre tenir compte de la nécessaire hiérarchisation des exigences et de l'obligation de les lier à une structuration de l'information du système à faire en cohérence.

Suite à l'analyse ci-dessus de plusieurs outils conceptuels, nous allons maintenant présenter l'exploitation que nous en proposons. Nous expliquons également les adaptations nécessaires pour une exploitation optimale dans notre contexte de projet de construction d'infrastructure. Nous allons tout d'abord décrire comment ces concepts peuvent servir le projet. Nous verrons ensuite que leur utilisation permet de définir les limite du système étudié dans ce travail de thèse ainsi que les éléments qui interagissent avec ce système.

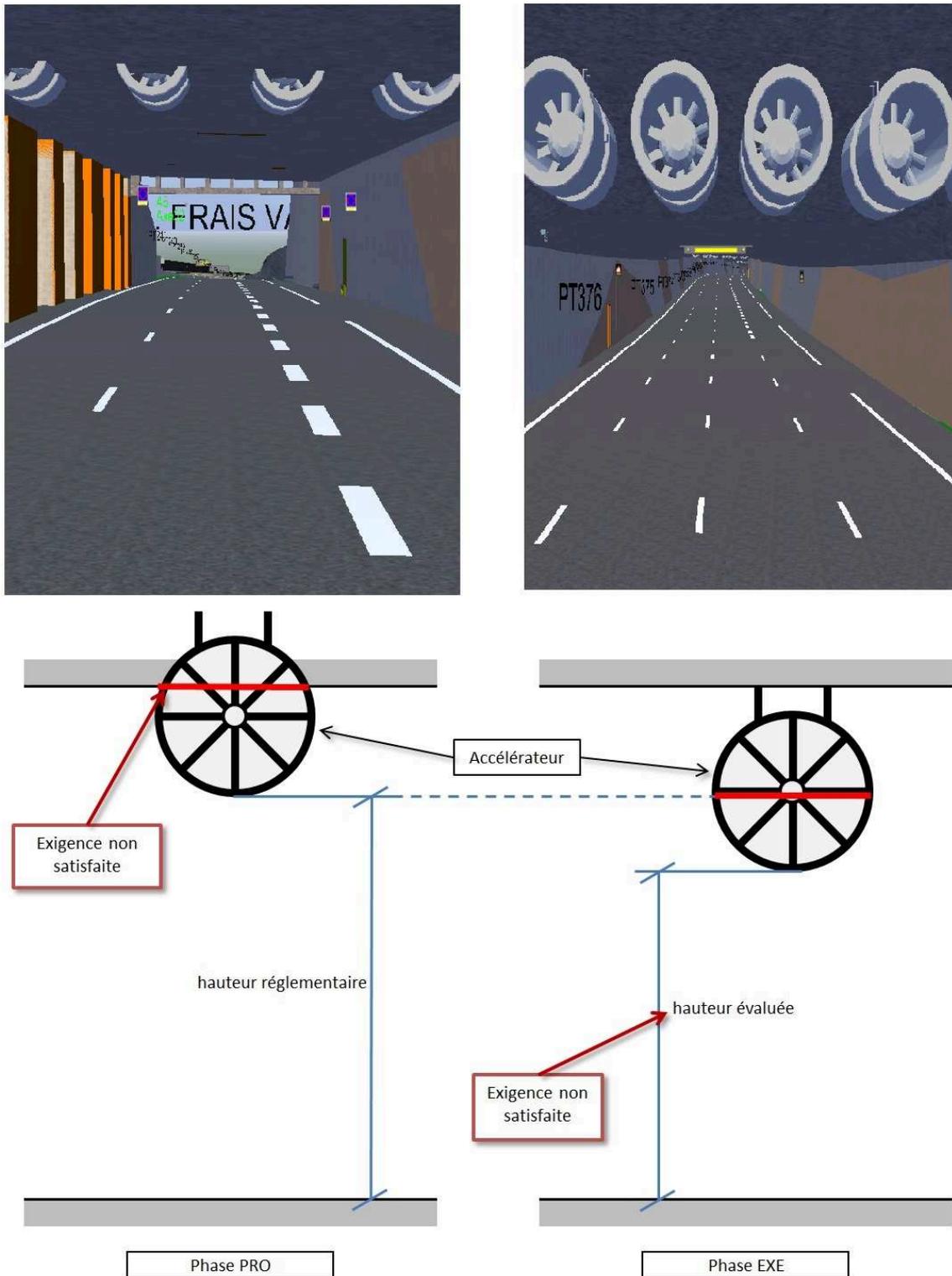


FIG. 4.8 – En partie haute : vues de maquette numérique. En partie basse : vue en élévation pour l'interprétation d'une exigence technique de gabarit en tunnel à différentes phases de projet, PRO et EXE. L'exigence n'est pas satisfaite car : en phase PRO l'accélérateur clash avec la dalle supérieure et en phase EXE la hauteur libre sous l'accélérateur est inférieure à la hauteur minimale réglementaire.

4.3 Concepts et outils au service du projet

Rappelons tout d'abord les concepts identifiés comme pertinents pour guider la structuration de l'information dans un projet et la définition du contenu des BIM uses. Cette seconde partie du mémoire de thèse se consacre aux modèles, à la modélisation et aux formalismes, à l'ingénierie système et à l'ingénierie des exigences. Ces outils conceptuels et méthodes deviennent incontournables dans le nouveau paradigme de *conception abstraite* évoqué plus haut. Cet ensemble est pertinent pour deux raisons principales, en complément de toutes celles évoquées précédemment :

1. ils servent la réflexion menée ici et permettent de poser le problème de façon claire et cohérente et d'en définir les contours ;
2. ils sont destinés à être immédiatement applicables en production et servent donc directement les projets.

La Figure 4.9 place ces trois outils par rapport au *système à faire* et au *système pour faire*. Nous retrouvons dans cette figure le fait que les outils utilisés sont les mêmes pour le *système à faire* et pour le *système pour faire*, ce qui permet une cohérence et une parfaite continuité pour la définition des BIM uses.

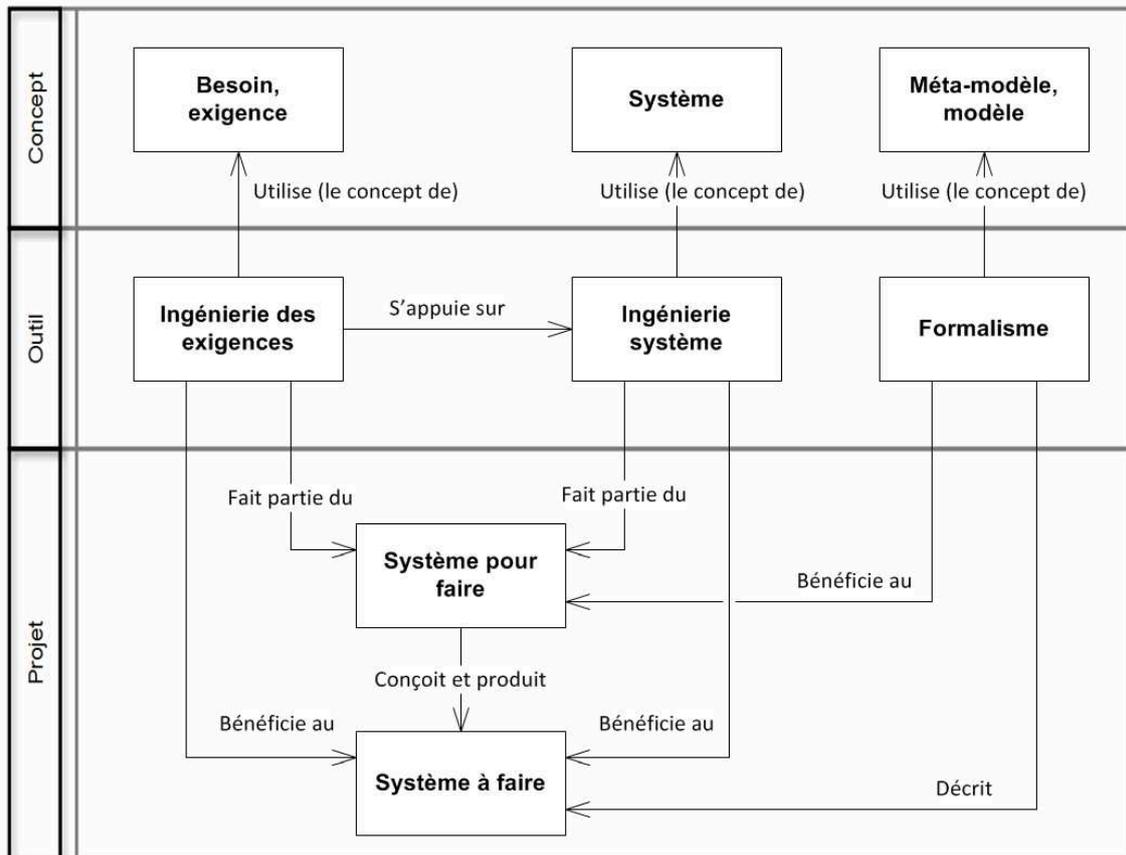


FIG. 4.9 – Intégration des concepts et outils proposés dans cette deuxième partie du mémoire de thèse par rapport au système pour faire et au système à faire. (Pour rester cohérent avec les précédentes figures, les liens notés « fait partie du » entre ingénierie système, ingénierie des exigences et le système pour faire peuvent également être définis par la mention « bénéficie au ».)

Ainsi, nous pouvons maintenant traiter la question principale qui concerne la structuration des objets dans le modèle de l'infrastructure en conception. Quels sont les éléments qui influencent directement cette structuration ? Quelles sont les interfaces de ce système structuré avec son environnement ? Enfin,

des processus BIM et parfois avec des processus classiques éprouvés. Cela explique cette distinction qui à terme doit disparaître, du fait des contrats et exigences des Maître d'Ouvrage mais également des capacités des outils actuellement (en progression dans cette optique). La Figure 4.10 montre clairement que les exigences (qu'elles soient de processus ou de produit) sont au centre de la relation entre les éléments contractuels, réglementaires et d'organisation de projet et le *système à faire*, résultat des activités du projet de conception. De plus, le BIM n'impacte pas directement tout le projet. Ce sont principalement les exigences de processus qui sont impactées. Cette remarque est cohérente avec notre vision du BIM qui nécessite une redéfinition et une réorganisation des activités de conception plus que de nouvelles activités. Le BIM est un processus de gestion de l'information en lien avec d'autres processus de projet.

4.5 La place de notre proposition de MCD par rapport à l'infrastructure physique

Nous étudions ici la phase de conception d'un projet d'infrastructure linéaire mais nous devons garder à l'esprit que cette phase n'est que provisoire avant la mise en service et à l'exploitation de l'infrastructure. Le texte qui suit est illustré par la Figure 4.11 ainsi que la Figure 4.3 page 86. Le *système à faire* du projet de conception est l'avatar du *système à faire* du projet complet. Deux conséquences à cela :

1. il faut assurer la continuité de l'information sur tout le cycle de vie du projet d'infrastructure pour que le système d'information obtenu à la fin du projet de conception soit en parfaite cohérence avec le produit livré à la fin de la construction ;
2. les exigences produit (qui contraignent le *système à faire* du projet complet, c'est à dire l'infrastructure construite et en service) doivent être vérifiées directement sur les modèles de l'infrastructure à construire (*système à faire* du projet de conception) : cette nécessité provient du nouveau paradigme de « conception abstraite ».

Par conséquent, les exigences portant sur les processus de conception (qui en partie permettent de créer l'information et d'en garantir la qualité) sont à considérer et influencent également la structuration du modèle de l'infrastructure et du *système pour faire*. Ainsi, les exigences de processus et de produit doivent être considérées simultanément. Les exigences produit font partie de l'environnement du *système à faire* et y sont directement liées (il s'agit de la déclinaison de la réponse aux besoins). La structuration des exigences impacte directement celle des éléments du modèle de l'infrastructure (la réciproque peut également être vraie lors de la considération des capacités des outils et standards). Nous verrons dans la partie suivante une proposition de structuration cohérente entre celle des exigences et celle des objets du modèle de l'infrastructure. La quatrième partie aura pour vocation de valider et d'apporter des modifications à cette proposition en se basant sur des cas pratiques d'expérimentation. Le concept de BIM use souvent évoqué et que nous détaillerons également dans la quatrième partie intègre ces deux types d'exigences puisqu'il concerne directement les objets du modèle (*système à faire* du projet de conception) et les processus qui garantissent la qualité de l'information produite (*système pour faire* du projet de conception). La définition de ces BIM uses contraint donc simultanément la structuration du modèle de l'infrastructure ainsi que l'organisation des activités de conception.

Cette Figure 4.11 illustre l'étroite liaison entre l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences. L'ingénierie des exigences permet de structurer et de contrôler que l'infrastructure conçue répond bien aux besoins du projet. Ensuite, l'allocation des exigences nécessite une structuration en système étudié apportée par l'ingénierie système. Il ne reste maintenant plus qu'à décrire la place que prennent les *Objet_I* par rapport au *système à faire* et au *système pour faire*.

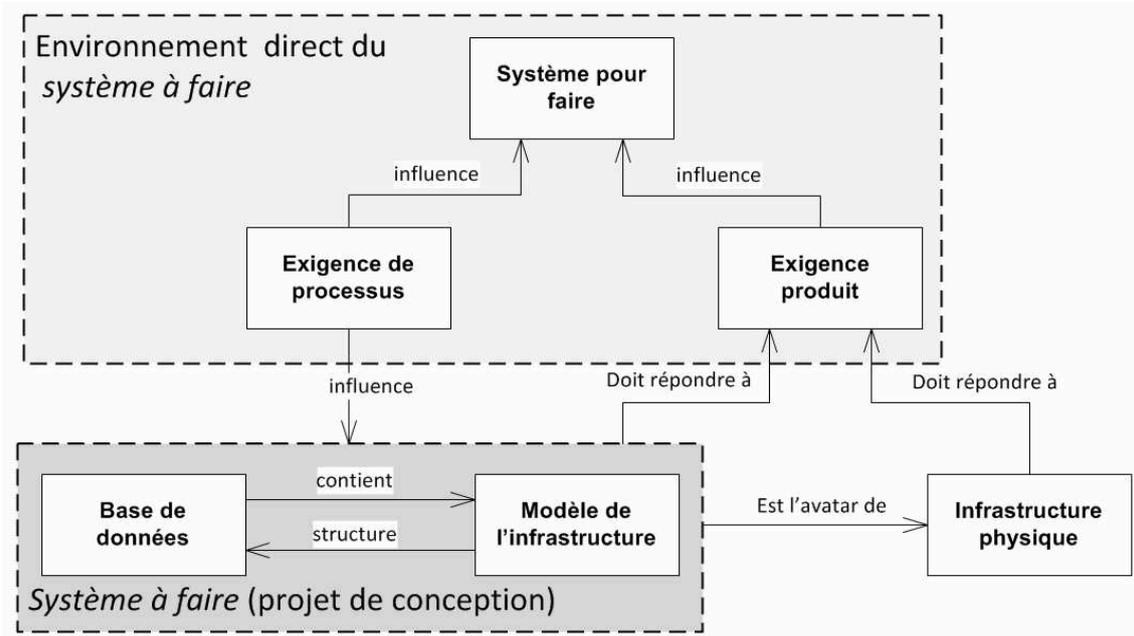


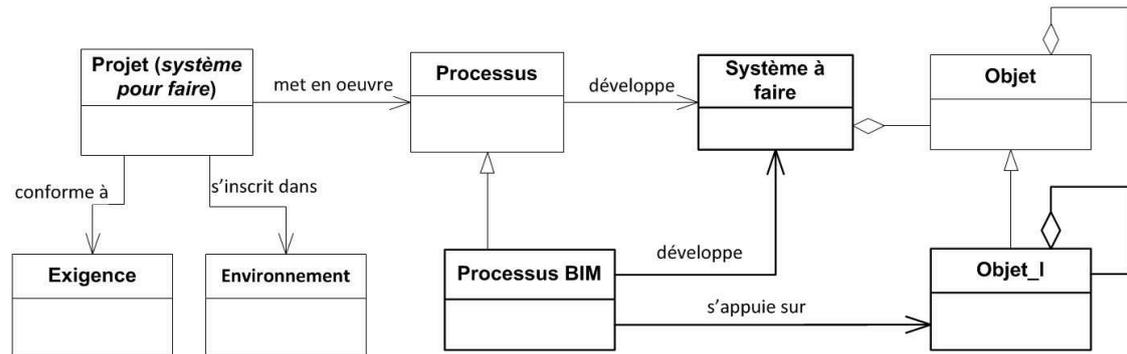
FIG. 4.11 – Mise en évidence de l'interaction entre les exigences de processus et les exigences produit (voir Figure 4.6 page 90 pour rappel) qui portent sur l'ouvrage à construire (infrastructure physique). Les points d'entrée pour la lecture de cette figure sont les exigences.

4.6 La places des Objet_I dans le projet

Nous avons dans un premier temps étudié le *système à faire* dans son environnement comme une boîte noire. Sans entrer dans le détail du *système à faire*, nous ajoutons dans cette section les éléments principaux qui constituent sa structure : il s'agit de lui porter un premier regard en le décrivant comme une boîte blanche. Les objets évoqués ici (et dont font partie les *Objet_I* évoqués précédemment) sont les objets du projet. Ils constituent la base de données et suivent l'organisation imposée par le modèle de l'infrastructure (éléments constitutifs du *système à faire*; voir pour rappel la Figure 3.4 page 71). La structuration de ces objets (liens de composition dans la Figure 4.12 à droite) sera traitée plus en détail dans le chapitre suivant et évaluée dans les cas d'usage de la quatrième partie. La Figure 4.12 présente les liens entre plusieurs éléments définis précédemment. Dans un processus classique de conception, un projet met en œuvre des processus (ou activités), conformément à des exigences (ces exigences sont les exigences de processus et non celles qui proviennent de la déclinaison des besoins, exigences non modélisées ici) et à un environnement qui rend la situation du projet de conception unique (cet environnement est l'environnement du *système à faire* et non l'environnement physique de l'infrastructure qui sera construite). Ces processus développent des objets, de natures variées, qui constituent l'ensemble du *système à faire*. Rappelons que ce dernier est dans notre cas le modèle de l'infrastructure à construire ainsi que la base de donnée de ce modèle. A ce niveau la réflexion, la Figure 4.12 présente une architecture générique. De plus, rappelons qu'un BIM use considère les *Processus BIM* et les *Objet_I* pour développer un *Système à faire* conforme aux *exigences*.

Cette modélisation en Figure 4.12 reflète la vision de l'ingénierie système décrite dans [Fiorèse et Meinadier, 2012], et appliquée à notre contexte particulier du domaine de la construction. Considérons maintenant les éléments dits spécifiques au BIM¹¹. Ils sont ajoutés aux processus classiques de conception pour développer le *système à faire*. Cela signifie que la réorganisation des activités de conception engendrée par l'introduction de processus BIM ne modifie pas entièrement la manière de produire puisque

11. Les éléments dits non spécifiques au BIM sur cette Figure 4.12 sont tout de même impactés par la mise en place du BIM sur le projet mais dans une moindre mesure et il ne sont pas prioritaires pour notre étude.



Légende :

Elément	Elément classique de projet	Elément	Elément directement impacté par la mise en place du BIM
---------	-----------------------------	---------	---

FIG. 4.12 – Intégration des processus et objets liés au BIM dans le processus classique de projet. Les éléments en traits gras sont ceux spécifiques à l'intégration du BIM dans le projet et sont donc fortement liés aux BIM uses du projet.

certaines processus ne sont pas spécifiques au BIM et ne sont donc pas impactés. Ainsi, les processus BIM sont une sorte de processus. Ensuite, tous ces processus s'appuient sur des objets spécifiques qui constituent le modèle de l'infrastructure. Parmi ces objets (au sens large : documents, acteurs, plans, livrable, etc.), certains sont dédiés à la modélisation visuelle et donc 3D de l'infrastructure (y compris leurs données attributaires et sémantiques ainsi que leurs méta-données) : il s'agit des « Objets_I ». Ainsi, l'*environnement* est très général et comprend l'environnement direct et l'environnement indirect. Cette architecture met bien en évidence les trois éléments qui nous concernent principalement ainsi que leurs fortes interactions : *système à faire*, processus BIM et *Objet_I*.

Conclusion de la deuxième partie

Les quatre dernières figures (Figure 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12) présentent le cœur de notre proposition de démarche pour définir le contenu des BIM uses. Elles illustrent le fait que l'utilisation de formalismes, de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences nous a permis de définir les limites de notre sujet d'étude et ses relations avec son environnement. Nous avons ainsi mis en évidence, à l'échelle de tout le projet, les liens étroits entre le *système à faire* et le *système pour faire* dans les processus de conception. Cette approche combinée de plusieurs outils méthodologiques facilite également l'identification de l'environnement existant et des interactions entre l'infrastructure physique et ses systèmes, *système à faire* du projet entier, et l'environnement existant. La cohérence, nécessaire au bon fonctionnement de notre proposition, est en partie assurée par les formalismes normalisés utilisés. Pour résumer, l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences ont permis ici de :

- définir un cadre de réflexion et la méthode d'identification des exigences,
- cibler le sujet de la réflexion (système) ainsi que ses interfaces avec son environnement en lien avec les exigences à traiter,
- garantir une partie de la cohérence entre les différents schémas de modélisation et donc entre la structuration des exigences et de Objet_I.

Ce cadre solide contribue à affiner le processus de modélisation en trois étapes décrit dans la section 3.2 page 66. Citons en particulier la Figure 4.10 qui apporte :

- pour les étapes 1 et 2, l'identification des univers du discours en fonction du système étudié (partie du *système à faire*), les Objet_I pertinents à considérer relativement à l'exigence de produit considérée ainsi que et leurs modélisations (simplification et abstraction) ;
- pour l'étape 3, les formats à utiliser (contractuels par exemple) ou les réglementations et normes à suivre sur la structuration et la diffusion des données comme la directive européenne Inspire ou les normes ISO sur les IDM (exigences de processus BIM ou non).

Nous verrons concrètement l'utilisation de ce cadre conceptuel et méthodologique dans la quatrième partie au travers des cas d'usage.

Finalement, rappelons que le BIM est avant tout un ensemble de processus qui interroge et exploite de l'information structurée. Le BIM peut être considéré comme un processus d'optimisation quasiment comme n'importe quel autre processus [Obergruesser *et al.*, 2011]. A terme, les processus dits BIM qui répondent à des problématiques spécifiques en parallèle d'autres processus du projet devraient disparaître pour laisser place aux *activités de conception*, réorganisées et modifiées, conséquence de notre entrée dans le paradigme de la *conception abstraite*. D'autres industries utilisent les outils méthodologiques évoqués dans cette parties de manière totalement transparente dans leurs activités de conception. Ensuite, malgré les avantages évoqués des outils et concepts présentés dans cette partie, ils ne sont pas suffisants pour la définition fine du contenu des BIM uses, c'est-à-dire pour l'identification des univers du discours ou ontologies relatives à chaque exigence ou ensemble d'exigences. D'autant plus dans un contexte d'ingénierie concourante, l'identification de ces informations pertinentes nécessite de s'appuyer

sur une structuration de l'information solide : d'autres outils conceptuels pour affiner ce contenu selon l'avancement de la conception sont nécessaires. Ainsi, les prochains points que nous traitons concernent la structuration du découpage du projet en objets, qui n'a pour le moment pas de solution évidente comme nous l'avons expliqué en fin de première partie sur l'exemple du projet L2 Marseille. Nous pouvons traiter ces questions maintenant que nous avons établi une méthode d'identification des besoins en modélisation de l'information.

Troisième partie

ADAPTATION DES CONCEPTS EXISTANTS DE NIVEAUX ET
PROPOSITION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES POUR
LES PROJETS D'INFRASTRUCTURES

Introduction de la troisième partie

*Le moment viendra où la construction des modèles elle-même deviendra, sinon
une science, du moins un art.*

René Thom.

Cette citation annonce que nous allons aborder la partie modélisation de notre proposition. Nous allons suite à une analyse de concepts existants de niveaux, proposer un modèle de structuration de l'information puis exposer les étapes pour l'alimenter et les outils pour le structurer.

La partie précédente apporte un cadre et une méthode de travail à l'échelle de tout le projet. Il convient maintenant d'opérer une étude minutieuse des outils qui doivent permettre d'affiner la définition du contenu des BIM uses. Nous allons voir que certains de ces outils existent mais qu'ils sont mal définis. Dans le contexte des projets d'infrastructures linéaires, leur utilisation conjointe est indispensable mais elle amène à des contradictions et des incompatibilités sémantiques et techniques.

Tout d'abord, nous procédons à une analyse détaillée des éléments existants pour la structuration de l'information. Ces concepts traitent simultanément de plusieurs sujets : multi-représentation, modélisation en fonction d'un point de vue ou d'une échelle, niveau de détail dans l'information attributaire ou sémantique, etc. L'application des concepts de *Level Of Detail* (LOD) et de *Level Of Development* (LODt) aux projets d'infrastructures urbaines ne peut relever de leur définition actuelle. Nous en détaillons plus bas les raisons. Nous explorons également la structuration proposée dans les livrables du projet ANR Communic spécifiquement développée pour les projets d'infrastructures. Cette troisième partie se termine avec une comparaison de ces niveaux existants au travers de leurs sous-concepts implicites. Nous apportons ensuite une proposition de réorganisation de ces sous-concepts au sein de nouveaux niveaux. En effet, nous avons jugé tous ces sous-concepts indispensables à une structuration de l'information. Notre travail montre également l'intérêt de ces niveaux tels que nous allons les redéfinir pour affiner et structurer l'information lors des trois étapes de la modélisation décrites dans la partie précédente. Suite à ces analyses, nous nous intéressons à la cohérence entre la structuration des objets qui représentent le projet et son environnement existant et la structuration des exigences que nous avons précédemment étudiée. En complément, le travail repris dans cette partie se veut contribuer au développement d'un cadre méthodologique pour la description du contenu des BIM uses. Cela afin de concilier la réponse aux exigences, les processus du *système pour faire* (qui garantissent la qualité de l'information du *système à faire*, livrable du projet de conception) et la structuration de notre proposition de modèle conceptuel de données.

Nous souhaitons apporter une précision quant à la considération de tout le cycle de vie du projet. Notre travail a pour objectif de proposer une démarche de travail appuyée sur un modèle conceptuel de données (partiellement) générique. Pour la conception, il doit donc être conceptuellement compatible avec les modèles de données ou standards existants. Un enjeu majeur du BIM est de couvrir l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage construit. Couvrir tout le cycle de vie d'une infrastructure constitue un sujet trop large qui nécessite de traiter d'autres cas d'usage que ceux de la quatrième partie (phases d'études d'exécution et d'exploitation). Toutefois, bien que notre travail considère en premier lieu la phase de conception, la méthodologie décrite dans la partie précédente peut s'appliquer à toutes les phases d'un projet.

Les concepts existants de structuration de l'information par niveaux

Dans le précédent chapitre, nous proposons une méthode d'application de l'ingénierie des exigences dans notre contexte de conception d'infrastructure. Ainsi, il est possible d'identifier les besoins en échange d'information et en modélisation du projet. Nous avons évoqué le concept de « niveau de détail » comme outil pour aider à la définition et à la structuration du contenu des BIM uses. Nous analysons donc dans cette partie les différents concepts de niveaux qui permettent en principe de répondre à cet objectif. Les observations que nous allons faire ci-dessous sur les Level Of Detail de CityGML (LOD) sont plus nombreuses que celles portées sur les Level Of Development (LODt) pour la conception. Plusieurs raisons expliquent cela. Tout d'abord, les LOD de CityGML sont constitués de plusieurs concepts importants pour les étapes de modélisation contrairement aux LODt. Ensuite, les LOD répondent à de nombreux besoins tant en terme de modélisation visuelle qu'en terme de structuration de l'information. De même que pour l'argument précédent, les LODt montrent un champ d'action plus restreint sur ce point. Après avoir analysé les LOD et les LODt, nous examinerons les Level Of Definition (LODef) définis pour les projets d'infrastructure afin de mieux appréhender cette notion d'abstraction de la modélisation et de découpage du projet en objets. Nous commençons cette partie par la présentation de notre analyse des LOD de CityGML. Elle est la plus conséquente des trois analyses mais facilitera grandement celle des LODt et de LODEf car elle traite une grande partie des sous-concepts étudiés dans ce chapitre.

Cette partie contient un nombre important d'acronymes, dont certains sont identiques dans leur composition mais différents dans leur écriture littérale. Ainsi, pour le level of detail, trois acronymes existent : LOD, LoD ou Lod. Ils ont chacun un sens différent, qui n'est par ailleurs pas le même que lorsque l'on évoque simplement le niveau de détail (voir pour rappel la note de bas de page numéro 9 page 9). Dans le chapitre suivant, nous proposons une nouvelle signification pour ces LOD, LOI et autres niveaux. Nous avons fait le choix de conserver les mêmes acronymes pour maintenir une cohérence avec l'existant et avec le sens générique de ces concepts. Le glossaire peut par ailleurs aider à la lecture lorsque plusieurs de ces acronymes sont présents simultanément.

5.1 Le concept de Level Of Detail (LOD) de CityGML

Cette section sur les LOD de CityGML se compose de quatre parties :

1. définition normalisée des LOD,
2. façon dont sont interprétés et utilisés les LOD,

3. formulation d'observations critiques dans notre contexte d'application,
4. perspectives d'évolution du concept de LOD dans des travaux en cours,
5. conclusion sur cette analyse pour identifier les besoins insatisfaits ou éléments importants des LOD à conserver pour notre proposition.

5.1.1 Définition du concept de LOD de CityGML

Comme nous allons le voir ci-dessous, le concept de Level Of Detail (LOD) de CityGML prend une place de premier plan dans le CityGML [Norme de CityGML, 2012]. Nous étudions ci-dessous en quoi les LOD complètent l'utilisation de CityGML et le rendent bien plus pertinent dans la modélisation et la visualisation de données urbaines 3D que par la seule considération de ses classes d'objet. Commençons tout d'abord avec la définition normalisée des LOD extraite de la norme de CityGML [Norme de CityGML, 2012] :

Les LOD sont nécessaires pour tenir compte des processus indépendants de collecte des données dédiés à des applications différentes. En outre, les LOD facilitent la visualisation et l'analyse des données. Dans un fichier CityGML, un même objet peut être représenté simultanément dans plusieurs LOD, ce qui permet une analyse et une visualisation d'un même objet avec plusieurs degrés de résolution. De plus, deux ensembles de données en CityGML contenant le même objet mais à des LOD différents peuvent être intégrés et combinés. Cependant, il revient à l'utilisateur ou à l'outil de s'assurer que les objets présents dans les différents LOD se réfèrent bien au même objet du monde réel.

La suite de la définition explicite à partir d'un exemple (un bâtiment) le concept « multi-scale modelling » (LOD). Voici une traduction de la signification des différents LOD de la norme CityGML extraite du travail de [Lowner et al. \[2013\]](#) (on peut simultanément se référer aux Figures 5.1, 5.2 et au Tableau A.1 qui illustrent cette définition) :

- *LOD0* : le bâtiment est représenté par son emprise au sol ou par le contour de son toit. Les deux sont des surfaces horizontales avec une valeur de hauteur constante. Cette représentation correspond à une représentation cartographique de la ville et permet l'intégration de données 2D provenant du plan cadastral par exemple.
- *LOD1* : le bâtiment est représenté par un simple bloc 3D, souvent une extrusion verticale des parcelles 2D du LOD0 sans structuration sémantique.
- *LOD2* : le bâtiment est représenté par une géométrie simplifiée. C'est à ce « niveau de détail » que doivent apparaître les éléments de type paroi (représentée par la classe WallSurface), toit (RoofSurface), terrain (GroundSurface), sol extérieur (OuterFloorSurface), plafond extérieur (OuterCeilingSurface) ou une ClosureSurface. Une ClosureSurface ne correspond pas à un objet réel, mais est introduit pour traduire la construction de volumes fermés. Le LOD2 offre également la possibilité d'ajouter des éléments tels que les cheminées, les lucarnes ou les balcons (utilisation de la classe BuildingInstallation).
- *LOD3* : le bâtiment est représenté par une enveloppe extérieure exacte [autrement dit la plus détaillée possible conformément au matériel de relevé ou d'implantation]. Du point de vue sémantique, cette représentation est enrichie au moyen des classes Door et Window, comme spécialisations de la classe Opening. Avec le LOD3, le nombre de possibilités d'utilisation du modèle augmente encore. Suite à l'ajout des portes et fenêtres, les chemins d'accès aux bâtiments peuvent être analysés pour les scénarios d'évacuation ou des opérations de police. Les coefficients thermiques des fenêtres peuvent être ajoutés

pour les calculs de déperditions thermiques et pour estimer les besoins de rénovation par exemple.

- LOD4 : en complément de la représentation du bâtiment au LOD3 (enveloppe extérieure), le LOD4 permet d'ajouter les structures intérieures avec l'ajout de la classe Room qui est définie sémantiquement par des attributs de type class, fonction, et usage. Les Room sont délimitées par un ou plusieurs InteriorWallSurface, FloorSurface et CeilingSurface. Les équipements qui ne sont pas mobiles, à savoir les radiateurs ou les cheminées, sont représentés en utilisant la classe IntBuildingInstallation. Les meubles comme les tables et les chaises peuvent être représentés avec la BuildingFurniture. Depuis la version 2.0 de CityGML les géométries des classes IntBuildingInstallation et BuildingFurniture peuvent être représentées à l'aide d'une ImplicitGeometry. C'est une géométrie prototype [générique] qui est, pour des raisons de coûts, utilisée pour plusieurs objets.

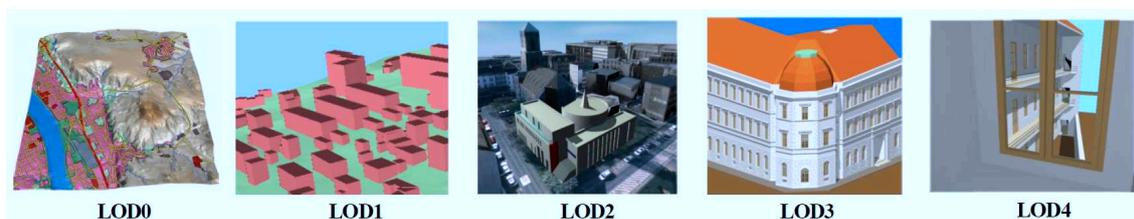


FIG. 5.1 – Les 5 LOD définis par CityGML d'après [Norme de CityGML, 2012].

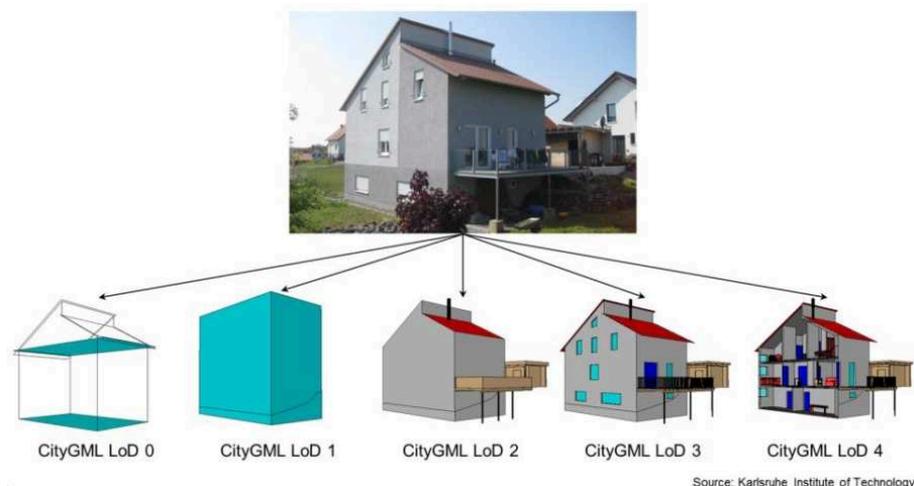


FIG. 5.2 – Représentation des 5 LOD de CityGML appliqués à un bâtiment courant [Lowner et al., 2013].

La suite de la définition précise que la modélisation des objets est gérée par les LOD au moyen d'un contrôle des paramètres de type précisions (sur la géométrie et l'implantation des objets) et de type dimensions de la représentation géométrique des objets (voir Tableau A.2). La norme évoque ces valeurs comme étant des propositions : elles sont donc discutables. Comme il est explicité dans la [Norme de CityGML, 2012], cette classification des objets par LOD selon leur précision permet d'évaluer la qualité d'implantation et de relevé des objets modélisés et plus globalement du modèle. Les méthodes de récolte des données (précision du relevé de l'existant) indiquent donc directement par rapport au Tableau A.2, à quel LOD cette géométrie relevée sera affectée.

Nous reprenons ici une longue phrase pour illustrer le fait que les LOD de CityGML intègrent implicitement de nombreux concepts. D'après Kruger et Kolbe [2012] :

La prise en compte de la géométrie, de la topologie, de la sémantique et de l'apparence des divers objets du milieu urbain dans les différents LOD couplée à une généralisation et une agrégation formant la structure hiérarchie des objets à différentes échelles hiérarchiques et la capacité de concevoir des extensions spécifiques par domaine de l'environnement urbain construit un environnement stable pour la réalisation d'analyses multi-échelles et des simulations pour les environnements urbains 3D grâce au CityGML.

Détaillons les points importants de cette affirmation. L'idée de structuration hiérarchique des objets au travers des LOD est bien présente (agrégation et généralisation, voir section 3.5 page 72). Le lien entre LOD, objet et échelle est également évoqué. Nous verrons que cette hiérarchisation des objets selon l'échelle et le « niveau de détail » de leur modélisation ne peut pas toujours être corrélée de manière linéaire avec les analyses qui utilisent le modèle. Ainsi, bien que la citation ci-dessus évoque un nombre important d'éléments présents dans le CityGML, leur application cohérente n'est pas encore possible. Le démontrer est l'objectif de ce chapitre.

Pour résumer, la croissance du LOD correspond à l'augmentation du détail et de la précision de sa description, tant géométrique que sémantique, pour un même objet présent pour plusieurs LOD : par exemple un mur au LOD2 devient un mur avec une ouverture de type fenêtre au LOD3 (l'objet est le même, seule sa géométrie change) ; le mur peut également être qualifié par des attributs complémentaires entre sa définition au LOD2 et sa définition au LOD3 (voir Figure 5.3).

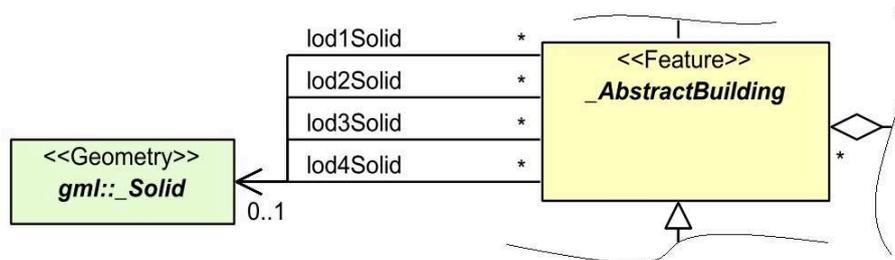


FIG. 5.3 – Modélisation en UML de la multi-représentation d'un objet au travers des LOD (lod sur la figure), d'après [Norme de CityGML, 2012]

Donnons un exemple précis : selon le LOD utilisé, une analyse est plus ou moins précise comme l'illustre Brasebin [2014] : dans l'exemple traité sur l'irradiation solaire d'un quartier, il existe une différence d'ensoleillement moyen à l'année de seulement 1 % entre une modélisation au LOD1 et au LOD2 mais pouvant aller localement jusqu'à 33 %. Cela exprime la nécessité d'identifier le point de vue pertinent (ou échelle au sens niveau d'abstraction) par rapport à la précision des calculs attendue. On retrouve ici partiellement la nécessaire cohérence évoquée en partie 1.1.6 entre le niveau de détail sémantique (« ce que l'on retient du monde réel ») et géométrique (précision et résolution).

Pour la suite du document, posons une définition lexicale afin de faciliter la compréhension des comparaisons entre LOD : puisqu'ils sont classés de 0 à 4 avec 0 le moins détaillé et 4 le plus détaillé, nous avons bien la correspondance entre le 0 qui est faible ($0 < 4$) et les chiffres 1, 2, 3 et 4 supérieurs à 0 qui traduisent un « niveau de détail » plus élevé, ou plus grand.

5.1.2 Les utilisations possibles des LOD de CityGML

Les LOD sont définis dans une norme de l'OGC [Norme de CityGML, 2012]. Il s'agit d'un document normatif mais nous allons voir dans cette partie que leur définition permet des interprétations et laisse une certaine liberté, appréciable pour les utilisateurs mais également délétère pour l'interopérabilité.

D'après l'analyse précise de CityGML faite par Groger et Plumer [2012], qui ont participé à la spécification de cette norme et à la définition du modèle, ces LOD de CityGML diffèrent de ceux utilisés en visualisation informatique. Ces derniers font varier le niveau de détail de représentation seulement en fonction de la distance entre le point de vue de l'utilisateur et les objets (plus la distance à l'objet est importante, moins le niveau de détail est élevé ; ce point a été évoqué en section 1.1.4). Par contre, pour [Groger et Plumer, 2012], le concept de LOD sert à sélectionner un modèle suffisant pour accomplir une tâche ou une analyse, tout en conservant une pertinence entre le temps de calcul nécessaire à l'affichage du modèle et les limites cognitives des utilisateurs (quantité d'informations qu'ils peuvent exploiter dans une scène sans la surcharger d'informations). Toutefois, selon les acteurs qui utilisent ces LOD et composent des modèles en CityGML, leur exploitation varie puisqu'elle n'est pas strictement définie dans la norme. Certains l'utilisent comme un degré de généralisation, d'autres comme un moyen d'améliorer les performances de visualisation (c'est dans ce cas une utilisation proche du niveau de détail dans l'infographie et la visualisation 3D [Biljecki *et al.*, 2013] mais qui n'exploite pas le réel potentiel de ce concept de LOD). Pour Biljecki *et al.* [2013], en plus de faciliter la visualisation et l'analyse des données, les LOD reflètent le processus de récolte de ces données. Par ailleurs, au lieu de considérer 5 LOD avec une augmentation du détail géométrique et sémantique croissante, Biljecki *et al.* décrivent plutôt trois catégories de LOD principaux avec des fonctionnements différents [Biljecki *et al.*, 2014b] :

- la première catégorie concerne uniquement les objets en 2,5D (LOD0 classique de CityGML) ;
- la seconde catégorie est constituée des LOD1 à 3 qui jouent réellement le rôle de faire croître la complexité géométrique et sémantique des objets du modèle ;
- la troisième catégorie, constituée du LOD4, peu détaillé dans la norme et qui n'ajoute rien au détail des éléments extérieurs, mais concerne seulement l'intérieur des objets des LOD précédents.

Voici d'autres éléments d'interprétation des LOD, d'après [Lowner *et al.*, 2013]. Dans CityGML le concept de LOD permet de structurer l'information avec un raffinement progressif de la géométrie et l'adjonction de propriétés sémantiques. Ce raffinement est corrélé avec la notion d'échelle. Il est pertinent pour des modèles urbains pour représenter aussi bien des parties importantes d'un territoire que des bâtiments détaillés avec leur structure intérieure. Le concept de Level Of Detail peut être appliqué à toutes les classes thématiques représentant les principaux types d'objets dans les modèles de ville en 3D : *Bridge, Building, CityFurniture, CityObjectGroup, Generics, LandUse, Relief, Transportation, Tunnel, Vegetation*, et *WaterBody*. Concernant l'utilisation des LOD, contrairement au LOD1, l'enveloppe extérieure d'un bâtiment en LOD2 se distingue sémantiquement et géométriquement de celle du LOD1. Ainsi, nous constatons que plus d'applications sont possibles avec des données en LOD2 et les analyses sont plus précises. L'analyse des surfaces de toiture d'un bâtiment par exemple conduit à une estimation du potentiel en énergie solaire. Modéliser les éléments de type lucarnes et cheminées peut améliorer cette estimation si les effets d'ombre sont considérés. L'analyse de la surface totale des murs d'un bâtiment pourrait également aider à estimer l'isolation thermique à mettre en œuvre [Lowner *et al.*, 2013].

Enfin, les méthodes de décomposition des objets d'un modèle CityGML ne sont que le reflet des usages et de la production du modèle. Un seul point de vue général sur la modélisation du milieu urbain est décrit dans la norme de CityGML. Citons quelques analyses par LOD de CityGML qui justifient cette décomposition (pour les LOD1 à 4, la dernière proposition de chaque item est extraite de [Ferriès et Bonhomme, 2014]) :

LOD0 : analyse d'emprises au sol ;

LOD1 : acoustique, prise en compte sommaire des effets de masque entre bâtiments ;

LOD2 : analyse thermique (pertes des bâtiments, îlot de chaleur), potentiel énergétique récupérable par des capteurs en toiture avec prise en compte précise des effets de masques ;

LOD3 : analyse d'ambiance visuelle, apports solaires par les parois vitrées ;

LOD4 : analyse de circulation dans les bâtiments et connexions avec l'extérieur, besoins énergétiques des locaux.

Suite à ces éléments de définition des LOD de CityGML, nous pouvons maintenant procéder à l'analyse de ce concept. Ce travail va nous permettre de dégager les éléments importants à conserver pour notre proposition de modèle conceptuel.

5.1.3 Analyse et observations sur les LOD de CityGML

Pour [Benner et al. \[2013\]](#), « le concept de LOD de CityGML est la partie la plus citée du standard en raison de sa simplicité et de son utilité ». Pourtant, cette simplicité conceptuelle ne perdure pas lors d'applications pratiques comme nous allons le démontrer dans les paragraphes ci-dessous. Ce concept reste sujet à de nombreuses critiques que nous détaillons également ci-dessous. Les premières évoquées par [Benner et al. \[2013\]](#) restent générales à propos des LOD :

- ils complexifient le modèle ;
- ils imposent des restrictions d'utilisation du modèle ;
- leur extension pour les autres domaines thématiques autres que le bâtiment et le MNT produit des résultats incohérents de modélisation.

D'après [Lowner et al. \[2013\]](#), le concept de LOD a été développé d'abord pour le module du bâtiment et a ensuite été adapté aux autres modules. Nous détaillons ici notre analyse critique du concept de LOD de CityGML dans notre contexte de projet d'infrastructure, différent du bâtiment comme nous l'avons expliqué dans la première partie de ce mémoire. Notre travail n'a pas vocation à discréditer les LOD ou le CityGML. Nous visons plutôt à identifier les points bloquants ou les zones d'ombre dans ce standard pour une application dans un contexte de projet de conception. Nous évoquons notamment l'impact des LOD sur la structuration de l'information et sur la gestion de la multi-représentation. Les critiques ci-dessous proviennent du fait que l'objectif premier de la création de CityGML, et donc des LOD, était de transposer les approches de la cartographie classique dans des normes et modèles pour de la cartographie numérique 3D [[Borrmann et al., 2013](#)].

La définition des LOD sujette à des interprétations variables

Comme le montre la Figure 5.4, la norme de CityGML laisse de nombreuses possibilités de description d'un même objet pour chaque LOD [[Benner et al., 2013](#)]. Cela vient du fait qu'il n'existe pas de spécification réellement contraignantes sur la répartition des classes dans le modèle. C'est donc bien le sens que l'on donne à chaque LOD, pour une utilisation spécifique, qui permet de réellement définir l'information que contient chaque LOD. Un modèle en CityGML doit être accompagné de spécifications de modélisation qui complètent la norme. Ces spécifications décrivent ce que contient chaque LOD car comme l'expliquent [Lowner et al. \[2013\]](#), presque tous les attributs dans CityGML sont facultatifs, ce qui rend le modèle flexible mais ne facilite pas les échanges de données entre acteurs (un débat similaire existe autour des attributs obligatoires et facultatifs dans les échanges en IFC). Plusieurs types d'entités, d'attributs et de valeurs d'attributs sont soumis à interprétation. Citons l'exemple de la hauteur d'un bâtiment : est-elle définie à partir du point haut du sol ou du point bas, des fondations, du rez-de-chaussée ? La notion de *parties* du bâtiment est également sujette à interprétation : parle-t-on d'une décomposition verticale ou horizontale ? Enfin, pour situer verticalement un objet, il est localisé par une altitude et non par une appartenance à un espace comme dans les IFC, ce qui donnerait une information importante pour répondre aux exigences.

En ce qui concerne la sémantique, les modèles en LOD1 et LOD2 des Länder allemands par exemple ne contiennent généralement que les bâtiments, les modèles en LOD2 contiennent en plus les *boundary*

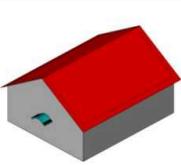
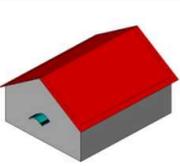
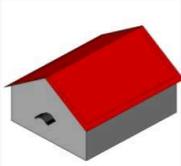
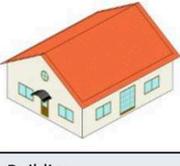
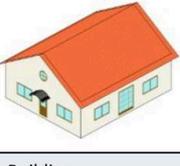
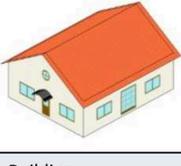
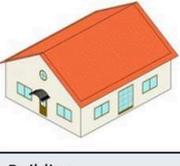
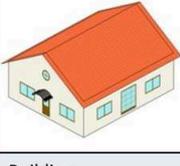
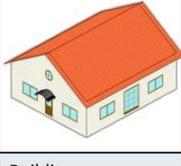
					
					
Building MultiSurface	Building Solid + MultiSurface	Building Multisurface WallSurface RoofSurface GroundSurface	Building Solid + MultiSurface WallSurface RoofSurface GroundSurface	Building No geometry WallSurface RoofSurface GroundSurface BuildingInstallation MultiSurface	Building Solid WallSurface RoofSurface GroundSurface BuildingInstallation MultiSurface

FIG. 5.4 – Variantes de modélisations permises par CityGML pour un bâtiment au LOD2 (ligne 1 affiche les possibilités par rapport à l'objet à modéliser en ligne 2)[Benner et al., 2013].

surfaces. Dans certains cas, la végétation et le mobilier urbain (réverbères par exemple) peuvent être présents. Les ensembles de données au LOD3 de certaines villes sont généralement texturés et géométriquement très détaillés, mais (du moins à la connaissance des auteurs de [Groger et Plumer, 2012]) la plupart ne fournissent pas d'éléments sémantiques tels que les lucarnes, balcons, fenêtres ou portes. Ainsi, les modèles disponibles ne contiennent généralement pas toute la sémantique disponible dans le modèle de CityGML. Cela rapproche les modèles décrits en CityGML de simples modèles géométriques 3D, contrairement à l'esprit initial qui était de permettre la génération et l'échange de modèles 3D de description du milieu urbain comprenant des éléments de sémantique et de topologie.

Biljecki et al. [2013] s'étonnent que malgré la forte utilisation du concept, il n'y ait pas de définition précise dans la norme. Dans le même sens, les LOD sont intéressants par leur flexibilité d'utilisation, mais également dangereux puisqu'il n'existe pas de règle stricte pour les objets et la sémantique à inclure ou non selon le LOD Groger et Plumer [2012]; Benner et al. [2013]. Seules certaines règles de modélisation sont immuables : un bâtiment au LOD1 aura toujours une représentation 3D avec un toit plat même si la valeur de son type de toit indique un faitage par exemple. Ensuite, Stadler et Kolbe [2007] rappellent que les informations de chaque LOD se doivent d'aborder une cohérence entre la sémantique et la géométrie. Chaque LOD a un niveau d'information sémantique minimum, spécifié par les modèles UML de la Norme de CityGML. Pourtant, Biljecki et al. expliquent que les LOD ne sont dirigés ni par la géométrie seule ni par la sémantique seule : la progression de l'information sémantique et géométrique est corrélées. Comme nous allons le voir, cette relation constitue une contrainte pour l'utilisation des LOD dans un contexte de conception. Elle n'est, par contre, pas suffisamment définie, ce qui rend variable et donc délicate la définition de l'information échangée en CityGML entre deux acteurs.

La définition actuelle des LOD ne permet pas de consensus d'utilisation de ce concept. Par conséquent, les directives et spécifications techniques telles que les exigences de précision pour chaque LOD ne sont généralement pas mentionnées ou le sont trop vaguement dans la version 2.0 de 2012. La version 3.0 de CityGML devrait apporter une définition plus précise des LOD. Toutes les interprétations possibles ne sont pas traitées ci-dessus mais cet extrait démontre que même pour des acteurs tra-

vaillant régulièrement avec les LOD et maîtrisant les concepts de la géomatique et de la cartographie, l'interprétation est fonction de chaque acteur. Ces différences ne semblent pas fondamentales pour la compréhension du modèle mais si deux acteurs ne conçoivent pas ce concept de la même manière, l'interopérabilité lors des échanges de modèles en CityGML n'est plus établie. Ce constat est d'autant plus vrai dans un contexte de conception regroupant des acteurs aux sensibilités multiples et aux approches de modélisation variées.

Les LOD et la diversité des points de vue

Tout d'abord, en lien avec la définition donnée des niveaux de détail en géomatique (section 1.1.6 page 23), nous pouvons affirmer que le CityGML ne propose en fait qu'un seul univers du discours très large qui doit être utilisé par tous les acteurs (voir la Figure 5.5). Le CityGML malgré les LOD n'offre en fait qu'un seul point de vue, une seule décomposition possible du milieu urbain à modéliser (*modulo* les interprétations des règles d'appartenance des objets et attributs aux différents LOD). Les LOD détaillent les éléments de cet unique point de vue porté sur le milieu urbain et centré sur les bâtiments. Une variabilité de cet univers du discours est possible uniquement en ne considérant que certains objets ou classes d'objets.

Cas du CityGML : (peu importe l'exigence)

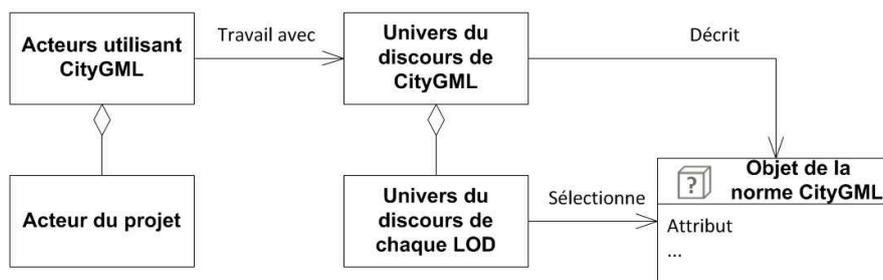


FIG. 5.5 – Modélisation de l'unicité de l'univers du discours décrit par le CityGML.

Les LOD et le CityGML, tels qu'ils sont définis, couvrent un large champ des études liées au milieu urbain. Toutefois, nous avons identifié que dans un projet d'infrastructure, de nombreux points de vue sont nécessaires. Cela se traduit par des besoins variables de décompositions du milieu urbain. Concrètement, un point de vue implique un arbre de décomposition et de relation des objets comme le montre sur un exemple simple la Figure 5.6. Le concept de LOD est bien défini pour les bâtiments. Il l'est moins pour des objets aux dimensions et proportions différentes, comme un arrêt de bus : par rapport à ses dimensions, un arrêt de bus ne sera représenté qu'au LOD3 alors qu'il serait à modéliser dès le LOD1 ou 2 pour des analyses d'accessibilité et de répartition spatiale par exemple (autre univers du discours que celui proposé par CityGML).

Donc, ces LOD de CityGML définissent un point de vue unique sur la représentation multi-échelle d'un modèle de ville. Nous nuancions toutefois ce propos. En effet, la manière donc ces LOD sont définis donne une cohérence dans la modélisation des objets du milieu urbain et rend donc les modèles issus de ces règles réalistes dans leur représentation visuelle. Notre proposition, en considérant plusieurs univers du discours et manières de modéliser un projet devra également veiller à rester cohérente avec la réalité des projets. Les expérimentations et cas d'usage de notre quatrième partie permettent ce contrôle.

Problèmes de cohérence de l'information aux transitions entre LOD

Les LOD sont souvent vus et présentés comme un concept traduisant les étapes d'augmentation du détail. Mais suite à la lecture de multiples travaux de géomatique sur la multi-représentation et la

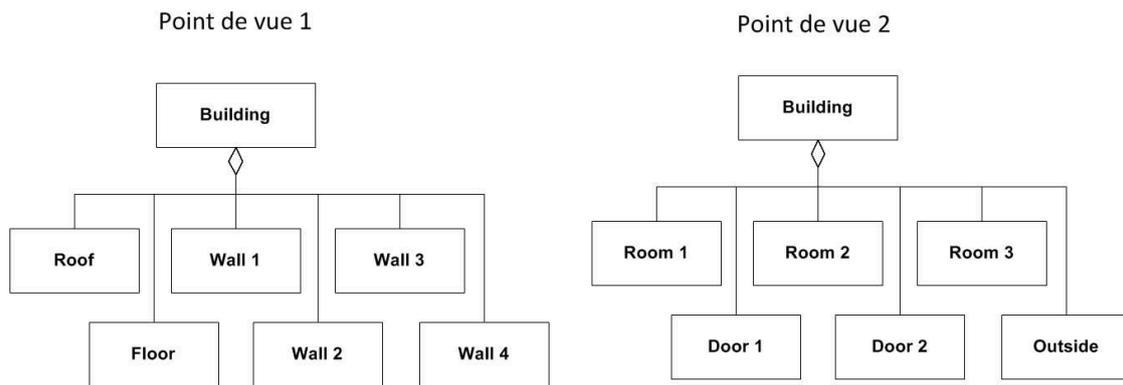


FIG. 5.6 – Deux décompositions possibles pour un même LOD.

gestion des bases de données multi-échelles, notamment [Parent *et al.*, 1997, 2006; Mignard, 2012; Ruas, 2004], il semble que le LOD soit plutôt un concept lié à la généralisation des données¹. Ainsi, il faudrait commencer par présenter les LOD à partir du LOD4 pour finir sur la généralisation la plus « aboutie » en LOD0. La manière de décomposer les objets en augmentant la précision, le détail, doit être gérée par d'autres concepts que nous verrons plus tard.

Benner *et al.* [2013] notent dans leur travail plusieurs incohérences dans l'utilisation des LOD sur certains objets que nous pouvons commenter.

1. A quoi correspond la modélisation au LOD4 de l'élément *WaterBodys*? Le LOD4 permettant de modéliser ce qui n'est pas visible de l'extérieur : « S'agit-il de la faune aquatique? » s'interrogent Benner *et al.* [2013]. En effet, le LOD4 est défini par l'ajout des éléments intérieurs, donc quel intérêt pour les objets comme *BuildingInstallation*, *WallSurface* or *RoofSurface*) d'avoir un LOD4?
2. La définition des LOD pour certains objets ne correspond pas réellement aux besoins de certaines analyses : par exemple la modélisation des fenêtres n'est possible qu'au LOD3, lequel demande par ailleurs une modélisation détaillée de la géométrie du bâtiment. Or cette complexité géométrique n'est pas nécessaire pour les calculs de besoins énergétiques contrairement à celle des ouvertures. Cela confirme bien les notre affirmation de la section précédente : le CityGML ne propose qu'un seul point de vue avec plusieurs niveaux de détail, ce qui ne permet pas de répondre à tous les besoins des projets d'infrastructures.
3. La modélisation des objets intérieurs (LOD4) est nécessairement unique, ce qui évoque la même problématique que le point précédent pour les différentes analyses basées sur les objets modélisant l'intérieur des bâtiments (études d'accessibilité aux personnes à mobilité réduite, sécurité incendie, réglementation des accès, etc.).
4. Il n'existe pas de spécifications pour définir les méta-données qui doivent accompagner chaque objet au travers des LOD. En effet, il n'est jamais précisé si la hauteur d'extrusion d'un bâtiment est celle du faitage, du bord de toit ou du dernier étage. D'ailleurs, l'emprise au sol qui sert également pour l'extrusion (LOD1) n'est pas non plus précisée : est-ce l'emprise au sol stricte ou l'emprise des bords de toit? Est-ce que les zones couvertes mais pas complètement fermées comptent? Etc.

Ajoutons un exemple cité par Lowner *et al.* [2013]. Si l'on s'intéresse à la continuité entre les objets et la sémantique des différents LOD, quelle serait l'utilité, si ce n'est visuelle, de pouvoir modéliser dès le LOD2 des cheminées, balcons ou lucarnes puisqu'il n'y a pas d'objets réels qui modélisent le conduit,

1. Voir pour rappel la section 3.5 page 72.

objet d'intérieur présent seulement au LOD4? Dernier éléments à signaler à propos des incohérences entre LOD : puisque l'appartenance d'un objet à un LOD est fonction de la précision de sa géométrie et de son implantation, les détections de clashes entre objets de LOD différents sont à analyser avec précaution. Il conviendrait ici de préconiser de n'utiliser que des objets d'un même LOD pour certaines analyses. Cette consigne est implicite dans la définition des LOD de CityGML puisque de manière générale, à un LOD correspond une base de données constituée dans un but précis mais ce n'est plus le cas dans un projet de conception. Par ailleurs, [Stadler et Kolbe \[2007\]](#) préconisent un alignement entre la description sémantique et la représentation géométrique, ce qui d'après les auteurs permet l'application de contrôles de cohérence sur des données [\[Stadler et Kolbe, 2007\]](#). Nous verrons que cette continuité ne s'avère pas pertinente pour un projet de conception. Selon les besoins, un décalage entre information sémantique et géométrique peut être nécessaire. Nous explicitons cela avec le [Tableau 5.6 page 135](#). Ces remarques mettent en avant le fait que le concept de « niveau de détail » appliqué dans l'absolu, conséquence de l'unicité du point de vue de CityGML, n'est pas pertinent même avec une application par module (module bâtiment, module pont, ...).

Ensuite, nous avons vu que dans un modèle CityGML, il n'existe pas de lien réel entre les sous-objets composant un objet à un LOD et l'objet lui-même au LOD précédent. Par exemple, un bâtiment représenté avec une *MultiSurface* au LOD2 n'est pas lié dans le modèle aux murs qui le représentent au LOD3 : le lien de composition entre objets n'a pas d'existence réelle dans un modèle en CityGML. Notre interprétation est que ce bâtiment ne peut avoir une représentation au LOD3 puisqu'il est représenté par la modélisation d'autres objets, qui eux n'ont pas de modélisation au LOD2 (voir [Figure 5.7](#)). Si l'objet *Building* a une géométrie au LOD3, il y aura conflit (ou superposition) avec les murs qui le représentent au LOD3. Il faut donc choisir de faire exister le bâtiment en tant que tel au LOD3 ou bien de le représenter par ses sous-objets comme c'est le cas dans cette [Figure 5.7](#). Les pictogrammes de PERCEPTORY font référence au type de géométrie pour représenter l'objet. Donc concernant la modélisation géométrique des informations des différents LOD, il n'y a dans le modèle de CityGML qu'une arborescence implicite entre un objet et les sous-objets qui le composent. Ainsi, dans la représentation visuelle, l'observateur ne peut que supposer les liens entre objets aux différents LOD.

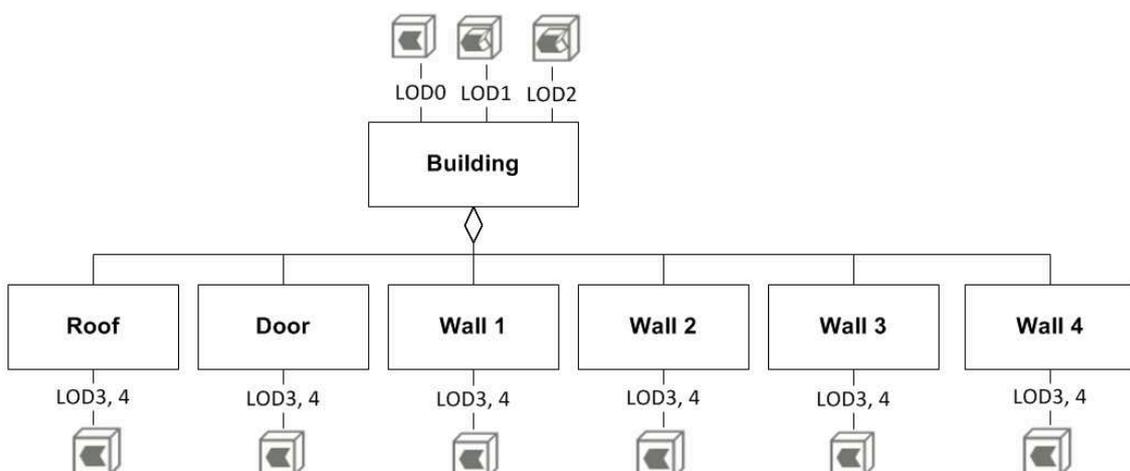


FIG. 5.7 – Représentations informelle des objets d'un bâtiment en CityGML.

Traisons maintenant des problèmes de continuité sémantique entre LOD. Par exemple, l'objet cheminée est au départ un BuildingPart. A un LOD supplémentaire il devient un RoofPart. L'utilisation de la multi-représentation d'objets dans des modèles 3D importants en quantité de données est nécessaire mais la gestion cohérente de ces multiples représentations est encore loin d'être formalisée d'après Breunig et Zlatanova [2011]. Il n'y a effectivement pas de règles pour passer d'un LOD à un autre et ce que contient chaque LOD n'est pas parfaitement défini dans la Norme de CityGML [2012]. Considérons également le cas de la continuité de la topologie entre objets sur un pont : topologiquement, le pont est lié à la route, ce qui permet aux LOD0, 1, voire 2, d'identifier une continuité du réseau routier. Au LOD3, la géométrie et la sémantique se précisent et donc l'objet *joint* peut apparaître (il n'existe pas dans la norme mais c'est le niveau le plus détaillé pour son apparition puisque le joint n'est pas à l'intérieur du tablier de pont). Ainsi, la topologie change suite à l'ajout dans la modélisation du joint entre la route et le tablier du pont, et donc avec le LOD (voir la Figure 5.8).

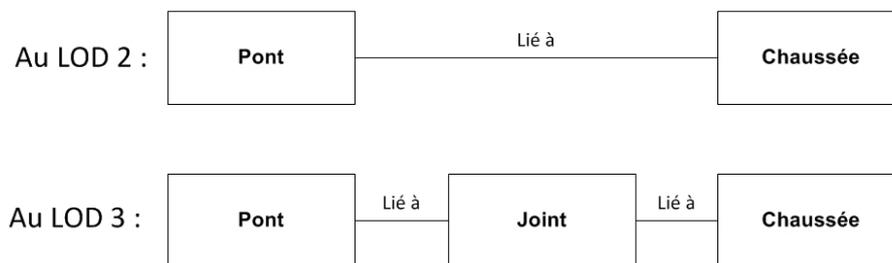


FIG. 5.8 – Exemple simplifié de perte de continuité topologique au changement de LOD.

Enfin, il est à noter que les modèles multi-LOD sont très rares et contiennent seulement 2 ou 3 LOD maximum sur les 5 possibles [Biljecki *et al.*, 2014b ; Ogori *et al.*, 2015]. Si plusieurs LOD sont présents ils proviennent de la généralisation des données des LOD supérieurs [Biljecki *et al.*, 2014a]. Cela signifie que l'intérêt des LOD, consistant à permettre l'assemblage de données décrivant les mêmes objets du monde réel mais avec des précisions ou moyens de relevé différents, n'est pas exploité. Cela vient de la manière de travailler et de penser de la communauté géospatiale qui ne mélange généralement pas plusieurs niveaux de détail dans les données. Cela signifie qu'un échange en CityGML se fait dans l'optique d'une ou plusieurs analyses déjà identifiées lors de la construction du modèle. Ces analyses sont généralement faites par un acteur qui porte un unique point de vue sur le modèle et travaille avec une échelle fixe. Pour un projet d'infrastructure, le fait d'assembler plusieurs modèles avec des niveaux de détails ou points de vue différents, impose une décorrélation entre le « niveau de détail », l'abstraction portée sur la réalité à modéliser et l'échelle. Ce n'est pas le cas dans la définition actuelle des LOD. Pour Borrmann *et al.* [2014], les niveaux de détail en géomatique correspondent au stockage indépendant des représentations d'un même objet dans des bases de données différentes. Il peut s'ensuire des incohérences entre les modélisations des mêmes objets. Donc, bien qu'en parfaite adéquation avec les besoins des géomaticiens, ce concept de LOD ne peut permettre, tel qu'il est actuellement défini, la modélisation et la gestion des multi-représentations des objets dans un projet de conception [Borrmann *et al.*, 2013, 2014]. En effet, notre proposition de redéfinition des LOD ainsi que l'extraction du concept de niveau d'abstraction du LOD vise à répondre à cette problématique.

Imbrication de concepts dans les LOD

Nous avons plus haut mis en lumière certains concepts implicitement intégrés dans les LOD de CityGML comme l'apparence, la géométrie, la sémantique, la précision ou même la présence d'un objet dans une représentation. Nous avons également expliqué le lien entre les LOD, l'échelle de modélisation

et le regard porté sur les éléments à modéliser. Cette section analyse plus en détail ces imbrications de concepts au sein du LOD.

En général, on ne représente un objet de manière précise que si l'information sémantique qui le décrit est également précise. Nous avons plus haut évoqué ce point et justifié la nécessaire décorrélation entre la sémantique et la géométrie, actuellement rassemblées au sein d'un même indicateur, le LOD. Mais au sein même de CityGML, un élément fragilise cette cohérence géométrique et sémantique pour la modélisation. D'après [Biljecki et al. \[2014b\]](#), la texture ne fait pas partie de la définition des LOD : elle peut être ajoutée n'importe quand. Pour [Biljecki et al.](#), la texture n'a qu'un rôle d'aide à la compréhension spatiale des relations entre objets. Cette liberté éloigne les LOD d'une utilisation standardisée, d'autant plus que la texture devrait pouvoir rendre compte des différents attributs, de la sémantique décrivant chaque objet ou de la précision de son relevé.

Ensuite, d'après [Kolbe et al. \[2005\]](#) et la norme de CityGML [[Norme de CityGML, 2012](#)], la représentation d'un objet simultanément dans plusieurs LOD permet l'analyse et la visualisation d'un même objet à l'égard de différents degrés de résolution. Mais cette affirmation est partiellement contradictoire avec ce que nous venons de décrire des LOD. Un objet de faible taille ne peut être présent à tous les LOD (voir pour rappel le [Tableau A.2 page 244](#)) alors que sa présence serait nécessaire aux LOD faibles. Par exemple au LOD1 les objets doivent avoir une emprise au sol minimum de 5 m par 5 m (voir [Tableau A.2 page 244](#)) : une borne de wifi publique ne peut donc pas être modélisée alors qu'une analyse de la répartition spatiale de ce type d'objet est faite plutôt à l'échelle de la ville qu'à celle du quartier. Une solution serait de définir des critères ou tout au moins des valeurs de critères spécifiques à chaque classe d'objet. Cette proposition rejoint en fait le premier axe de la modélisation, la sélection des objets par l'univers du discours. Ces critères contraignant l'appartenance des objets aux différents LOD nous apparaissent comme un outil peu efficace pour compenser le fait que CityGML ne propose en fait qu'un seul univers du discours malgré ses LOD (voir la [Figure 5.5 page 114](#) pour rappel).

[Biljecki et al. \[2014b\]](#) identifient plusieurs sous-concepts contenus dans le concept de LOD : la présence ou non d'un objet dans une modélisation, sa complexité géométrique, sa dimensionnalité (au sens de la dimension de l'objet et non de celle de l'espace dans lequel il est modélisé, avec comme valeurs possibles : 0, 1, 2 ou 3), son apparence ainsi que la sémantique et les attributs qui le décrivent. Ainsi, tous ces critères conduisent une modélisation spécifique eu égard à un contexte particulier (ou points de vue), sont pilotés de manière corrélée, par le seul concept de LOD. En lien avec ce travail, nous avons étudié chacun de ces sous-concepts et évalué si ils étaient gérés de manière implicite ou explicite par le LOD : notre analyse est la suivante (voir pour illustration le [Tableau 5.1](#)) :

complexité géométrique : c'est le sous-concept principal des LOD de CityGML ; les variations de LOD influent directement sur la complexité géométrique des objets (ou réciproquement, la complexité géométrique de l'objet implique son appartenance à un LOD élevé) ;

dimensionnalité : excepté pour le LOD0 pour lequel la géométrie imposée pour les bâtiments est une surface en deux dimensions, pour les autres objets et LOD, les règles ne sont pas strictes et la dimensionnalité des objets n'est pas liée au LOD : c'est un choix du modélisateur selon le type de relevé terrain ;

apparence : le texturage des objets n'est pas imposé dans les règles de composition des LOD ; l'apparence est plutôt régie par la précision générale du modèle qui a besoin d'un texturage plutôt réaliste pour les LOD3 et 4, par exemple pour conserver la cohérence évoquée plus haut entre précision, sémantique, etc. ;

sémantique : nécessaire pour chaque LOD, elle n'est pas strictement définie et varie fortement selon les interprétations de la norme de CityGML (voir [Figure 5.4 page 113](#)) ; par contre, la cohérence

avec le reste des critères de définition d'un objet pour un point de vue (au sens LOD) reste nécessaire ;

présence : selon le type, les dimensions ou la précision d'implantation d'un objet, la présence d'un objet est explicitement autorisée ou non pour chaque LOD (ou point de vue porté sur le modèle ; voir Tableau A.2) ;

attributs : les attributs disponibles pour chaque objet sont explicitement fonction du LOD (par contre cette répartition des attributs par LOD et par objet n'est définie dans la norme que pour quelques objets) ;

Ce caractère implicite ou explicite est discutable selon l'interprétation faite du concept de LOD. Retenons également que les sous-concepts identifiés comme implicites sont peu définis dans la norme de CityGML.

TAB. 5.1 – Analyse de 6 sous-concepts des LOD de CityGML (d'après une proposition de [Biljecki et al., 2014b]) avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	présence	attributs
illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	OUI ou NON	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
LOD (CityGML)	+	-	-	-	+	+

Légende :

- + : le sous-concept est explicitement gouverné par le type de niveau
- : le sous-concept est implicitement gouverné par le type de niveau
- 0 : le sous-concept n'est pas géré par le type de niveau

Ces six sous-concepts conditionnent la modélisation pour chaque point de vue ou LOD. Bien que leur définition pour chaque LOD et par classe d'objet ne soit pas forcément précise dans la norme, le fait est que ces critères évoluent de manière quasiment linéaire avec les variations de LOD. Cette relation volontaire confère une cohérence dans les informations décrivant les objets de chaque modèle CityGML. Mais nous avons vu ci-dessus que la géométrie et la sémantique ne peuvent être liées et que selon le niveau d'abstraction et les besoins de modélisation ou de l'acteur qui exploite le modèle, tous ces critères sont utilisés de manière décorrélée. Les LOD ne peuvent donc pas être définis dans l'absolu, de manière générique avec une dépendance scalaire entre chacun des six sous-concepts évoqués ci-dessus. Biljecki et al. [2014b] proposent des relations non linéaires entre la croissance des LOD et la croissance des six sous-concepts évoqués ci-dessus. Mais ce travail conserve les éléments fondamentaux du concept de LOD que nous venons d'identifier comme un obstacle à une exploitation en projet de conception. Au travers de l'analyse ci-dessous d'autres types de niveaux, nous allons voir que nous retrouvons ces sous-concepts mais gérés différemment. Nous affirmons de plus que répondre à ces sous-concepts pour chaque objet revient en fait à traiter les deux premiers axes de la modélisation en trois étapes : univers du discours et simplification ou abstraction². Comme ces éléments sont dépendants dans les LOD de CityGML, cela valide à nouveau notre affirmation sur l'existence d'un unique univers du discours dans le CityGML malgré les LOD.

Malgré ces critiques, le concept de LOD (et ses sous-concepts) reste conceptuellement pertinent pour la modélisation des données du milieu urbain. Nous proposerons une redéfinition de ce concept après notre analyse des niveaux de développement et de définition. Nous ferons également état d'autres moyens de structurer l'information et de sélectionner les éléments pertinents selon le contexte d'utilisation, ce que font les LOD mais uniquement par rapport à des critères d'échelle. Ainsi, nous supprimons les interdépendances entre sous-concepts.

2. Voir pour rappel la section 3.2 page 66.

Les LOD pour les projets d'infrastructures linéaires

De manière générale, le concept de LOD est illustré en s'appuyant sur l'objet bâtiment, qui est l'exemple le plus explicite. Mais il semble qu'un autre argument plus profond fasse que le bâtiment soit l'objet principal pour la définition des LOD. Il semble que le bâtiment soit l'élément principal de la modélisation du milieu urbain, idée que l'on retrouve chez plusieurs auteurs cités par [Billen et Zlatanova \[2003\]](#), bien que ces derniers ne partagent pas cet avis. Telle que la ville est envisagée et étudiée aujourd'hui (approche systémique [[Toubin, 2014](#)] et métabolique [[Di Nardo, 2015](#)] par exemple), les bâtiments ne peuvent plus être considérés comme les éléments structurants et fondamentaux de la ville. Ainsi, le concept de LOD ne doit pas être centré sur l'objet bâtiment. Nous cherchons à évaluer les possibilités d'application du LOD pour des projets d'infrastructure urbaine. Or, nous avons décrit dans notre première partie que les multiples acteurs concernés par la modélisation du projet d'infrastructure utilisent des univers du discours variés. Ils affichent des besoins et des intérêts divers qui sont parfois incompatibles avec la proposition de modélisation multi-échelles des LOD. Ci-dessous, nous étudions la proposition de modélisation d'une route selon le LOD. Cette proposition n'est pas suffisante pour modéliser une infrastructure routière. Elle s'avère également incompatible avec une application des LOD sur un modèle CityGML contenant des objets de toutes les thématiques du milieu urbain. Nous détaillons notre argumentaire ci-dessous.

Entrons dans le détail de la définition des LOD pour les objets de type route en gardant à l'esprit que cette définition s'applique dans l'absolu au modèle CityGML. La définition donnée dans la norme de CityGML est illustrée en [Figure 5.9](#). Tout d'abord, le LOD0 n'est pas cohérent avec le LOD0 des bâtiments. Le LOD0 pour une route ne représente que l'axe de la route et le sens de circulation. Donc il ne représente pas l'emprise de la route, contrairement au LOD0 pour un bâtiment qui comprend l'emprise au sol. Ainsi, pour une analyse d'occupation du sol, il faudra ajouter au LOD0 des bâtiments, le LOD1 des routes. Ensuite, le LOD1 pour une infrastructure définit l'emprise de la route. Puis les LOD2 à 4 regroupent l'ensemble des détails complémentaires. On ne retrouve plus la similitude avec les trois types de LOD décrits dans [[Biljecki et al., 2014b](#)] (voir section [5.1.2](#) page [110](#)) ou même avec les LOD pour les bâtiments. Par ailleurs, si le LOD4 correspond à la spécification du type de trafic qui emprunte les différentes voies, quand peuvent être représentés les réservations ou réseaux présents dans les couches de structure de la chaussée (ce qui correspondrait comme pour les bâtiments, à ce qui ne peut être vu de l'extérieur)? Ainsi, nous soulevons à nouveau la question de la différenciation des points de vue portés sur un même modèle à une même échelle.

Ensuite, concernant les critères de dimension et de précision des LOD, la description d'une infrastructure linéaire comporte des objets de toutes les tailles à quasiment toutes les étapes du projet. La [Figure 5.10](#) illustre cela : les dimensions des réseaux sont bien différentes de celles des ouvrages de la gare de péage par exemple alors que tous ces éléments sont nécessaires à la gestion des interfaces entre le projet et l'environnement existant. De plus, la précision de ces objets au cours de la conception ne croît pas de manière corrélée. Donnons un autre exemple. L'étude de l'emplacement d'un passage à faune par exemple nécessite de modéliser à la fois l'ensemble de l'infrastructure à une petite échelle (échelle d'analyse du comportement de la faune), donc des objets de grande dimension, ainsi que de plus petits objets comme le passage à faune lui-même (relativement à l'infrastructure) ou les clôtures fermant l'accès au projet. Ces éléments de clôture sont petits par rapport aux autres objets du projet mais ne sont pas, à cette étape (avant projet par exemple) implantés avec précision. Nous avons donc des objets petits avec une précision d'implantation faible alors que la logique des LOD décrit que des objets petits ont nécessairement une meilleure précision d'implantation que des objets de plus grandes dimensions. Illustrons notre propos d'un dernier exemple. Pour l'étude acoustique, nous avons besoin d'une géométrie des bâtiments grossière (équivalente au LOD1) alors que leur implantation spatiale

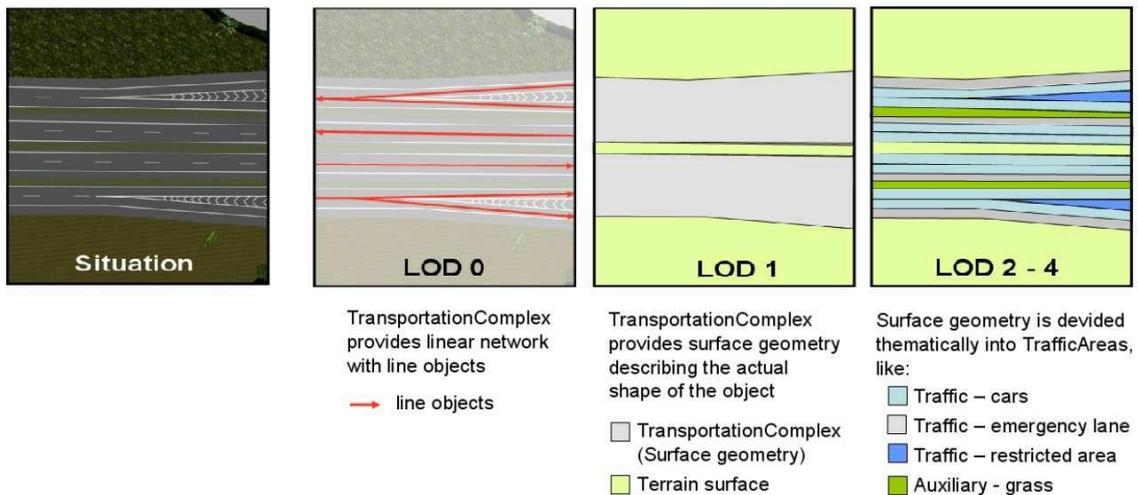


FIG. 5.9 – Application des LOD à l'élément TransportationComplex aux LOD0, 1 et 2 à 4 (source : Rheinmetall Defence Electronics), extrait de [Norme de CityGML, 2012].

est précise. Les informations relatives à l'objet route dont le bureau d'étude acoustique à besoin correspondent plutôt aux LOD2 à 4 alors qu'à cette phase d'étude, l'implantation de la route n'est pas assez précise pour appartenir au LOD2. Donc une fois de plus, certaines analyses nécessitent l'utilisation d'objets appartenant à différents LOD, si l'on se base sur les critères de précision et de dimension. Ainsi, le LOD ne joue plus son rôle de sélection des objets pertinents pour une analyse spécifique à une échelle donnée. La définition des univers du discours ou des ontologies, relativement à chaque analyse est plus efficace pour la sélection des objets pertinents à modéliser. Nous affirmons cela en comparaison des LOD qui basent cette sélection sur des critères corrélés de dimension et de précision. Donc l'approche des LOD tels que définis actuellement ne peut répondre aux besoins d'organisation de l'information et de modélisation de la même manière que pour un bâtiment. Elle ne correspond pas aux besoins de modélisation des projets d'infrastructures.

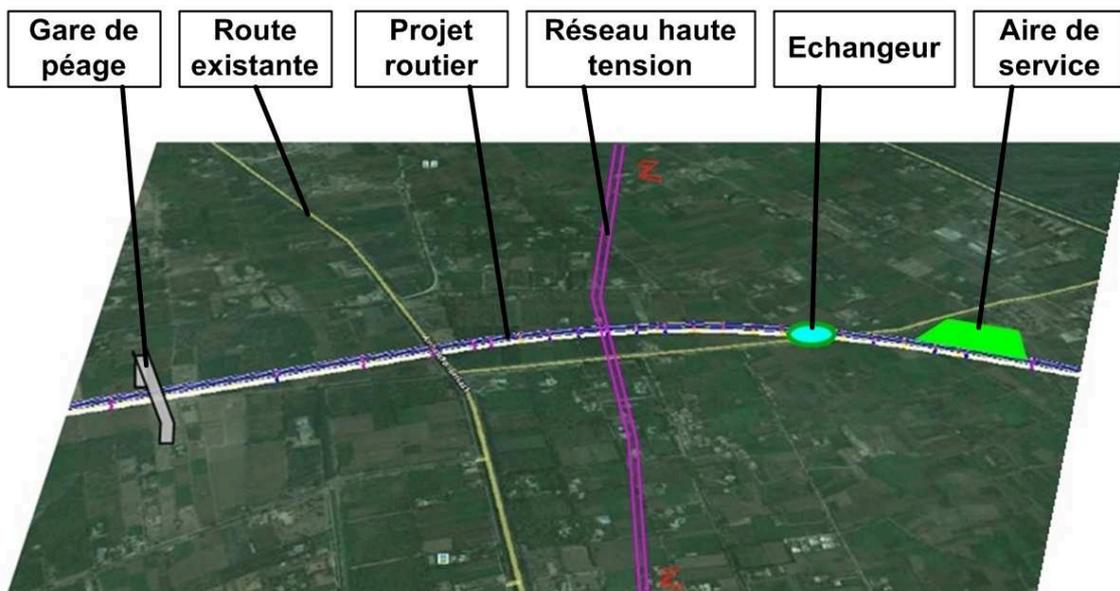


FIG. 5.10 – Illustration de la variabilité de la taille des objets à considérer dans un projet de conception d'infrastructure.

Il est par contre explicité dans [Norme de CityGML, 2012] que ces LOD pour les routes ne sont pas encore au point pour le moment, d'après Tamminga *et al.* [2013]. La prochaine version de CityGML (CityGML 3.0) devrait proposer une définition des LOD modifiée et plus détaillée. Nous venons de voir que le problème posé par l'application des LOD sur un projet d'infrastructure est plus profond que la seule redéfinition de certains paramètres des LOD pour l'objet route. Notons tout de même que la définition actuelle des LOD pour les routes est comme pour les bâtiments, proche de ce qui est demandé dans la directive européenne Inspire [INSPIRE Thematic Working Group Transport Networks, 2009].

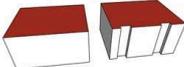
5.1.4 Propositions de compléments aux LOD de CityGML

De nombreux chercheurs œuvrent pour l'amélioration du concept de LOD de CityGML. Biljecki *et al.* [2014b] notamment en citent plusieurs dans leur travail. La section ci-dessous détaille certaines propositions d'amélioration ou de modification du concept de LOD de CityGML.

Différenciation de la géométrie et de la sémantique

Certains travaux proposent de différencier la partie sémantique et géométrique des LOD, respectivement « SLoD » et « GLoD » [Lowner *et al.*, 2013 ; Benner *et al.*, 2013]. Ces deux types de LOD sont également indépendants pour la définition du détail de l'intérieur et de l'extérieur des bâtiments. Pour la modélisation, le LOD sémantique ne peut généralement pas être supérieur au LOD géométrique : il s'agit bien ici de conserver une cohérence pour une exploitation plutôt visuelle du modèle structuré avec ces nouveaux LOD. C'est un argument recevable dans un contexte de modélisation visuelle. Mais, à nouveau, la corrélation entre niveaux d'information sémantique et géométrique n'est pas toujours corrélée de la même manière. Dans un projet d'infrastructure, l'étude du plan de signalisation s'effectue avec un plan synoptique : l'information sémantique est bien supérieure à l'information géométrique. Cette proposition permet également de modéliser l'intérieur des bâtiments également avec quatre Level Of Detail différents, contrairement aux LOD classiques qui n'en proposent qu'un. Cependant, par soucis d'exhaustivité, un autre type de niveau doit être considéré pour gérer l'apparence des objets de manière indépendante (ALoD). Dans cette proposition, les LOD ne vont ainsi plus gérer simultanément la géométrie, la sémantique et la représentation visuelle (texture) (voir Tableau 5.2). Cela confirme ce que nous avons argumenté précédemment.

TAB. 5.2 – Synthèse de notre interprétation de la proposition de Lowner *et al.* [2013] pour une distinction entre la géométrie et la sémantique dans la définition des LOD de CityGML avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	présence	attributs
Illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	OUI ou NON	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
LOD (CityGML)	+	0	-	-	+	+
Geometrical LoD (GLoD)	+	?	0	0	+	0
Semantical LoD (SLoD)	0	0	0	+	0	+
Apparence LoD (ALoD)	0	0	+	0	0	0

Légende :

- + : le sous-concept est explicitement gouverné par le type de niveau
- : le sous-concept est implicitement gouverné par le type de niveau
- 0 : le sous-concept n'est pas géré par le type de niveau

Différenciation de l'intérieur et de l'extérieur

Plusieurs travaux proposent de différencier des LOD pour l'intérieur et pour l'extérieur des bâtiments. Citons notamment [Billen *et al.*, 2008 ; Hagedorn *et al.*, 2009 ; Benner *et al.*, 2013 ; Biljecki *et al.*, 2014a]. D'après Biljecki *et al.* [2014a] il est important de séparer l'intérieur et l'extérieur d'un modèle pour

plusieurs raisons. Ce peut être le fait que les moyens d'acquisition de l'existant diffèrent entre l'intérieur et l'extérieur (précision, modélisation, rendu) ou bien que les besoins en modélisation de l'intérieur des bâtiments (accessibilité, usages, sécurité incendie . . .) sont différents de ceux de l'extérieur. Cette affirmation se rapproche de l'idée de distinguer des univers du discours et même des ontologies de domaines puisque les LOD s'appliquent indépendamment sur l'univers de l'intérieur et de l'extérieur des bâtiments. Concernant la sécurité incendie par exemple, bien qu'il s'agisse de la même réglementation pour l'intérieur et l'extérieur, les modélisations pour vérifier les conformités sont différentes du point de vue géométrique et sémantique. Voici un nouvel argument en faveur de la séparation des sous-concepts corrélés dans les LOD.

Dans leur travail, [Biljecki et al. \[2014b\]](#) proposent une alternative aux 5 LOD de CityGML : ils en décrivent 10. 10 pour l'extérieur (de 0 à 9) et parmi ceux-ci, 7 décrivent également l'intérieur (de 3 à 9 avec au LOD9 les objets *Door* et *Room* par exemple). Dans ce travail, il est indiqué qu'il peut exister des LOD avant le LOD0 et après le LOD9 puisque ces 10 niveaux (numérotés arbitrairement) ne couvrent que le champs de la modélisation 3D de la ville. Il s'agit d'une réponse à certains manques évoqués plus haut. Mais cette réponse est partielle : ces LOD restent dans une arborescence unique. Faciliter la modélisation de l'intérieur augmente l'univers du discours mais perpétue le fait que les LOD constituent un outils de variation du détail mais ne permettent pas d'exploiter des ontologies de domaines en fonction des exigences produit à traiter. Les six sous-concepts évoqués ci-dessus restent par ailleurs interdépendants. Ce besoin de différenciation de l'intérieur et de l'extérieur des bâtiments est également évoqué dans un contexte de corrélation entre le LOD de modélisation 3D et la gestion des risques [[Kemec et al., 2009](#)]. Les conclusions de ce travail préliminaire peuvent en conséquence s'exprimer ainsi : il manque une distinction entre le LOD intérieur et le LOD extérieur pour les bâtiments, le seul LOD4 se révélant insuffisant dans ce contexte. Mais cette application évoque la nécessité de détailler les LOD dans un contexte bien précis, et donc pour un point de vue spécifique à la gestion des catastrophes. Ce point de vue avec son univers du discours et ses LOD correspondrait à une abstraction différente de celle qui est faite avec le CityGML et les LOD tels qu'ils sont définis dans la norme. Cela correspond plutôt à la configuration de la [Figure 3.3](#), cohérente avec le processus de modélisation en trois étapes.

Adaptation des LOD pour les projets d'infrastructure

Certains travaux proposent une adaptation des LOD de CityGML pour un projet de tunnel en lien avec les auteurs de la [Norme de CityGML \[2012\]](#). Il s'agit du travail de [Borrmann et al. \[2012, 2013, 2014\]](#). Le modèle proposé permet des dépendances paramétriques entre les objets d'un modèle de tunnel multi-échelles pour faciliter le travail collaboratif. Dans cette proposition, les auteurs définissent leurs niveaux de détail (notés LoD ici) dans un contexte de conception, contrairement aux LOD de CityGML. Cette proposition ne considère, comme les LOD, qu'un seul point de vue porté sur le projet : le tunnel est considéré de la même manière, comme un volume, peu importe le « niveau de détail ». Seuls les objets qui le composent varient. De plus, les objets concrets n'apparaissent qu'au LoD 5 alors que les autres LoD (2 à 4) contiennent uniquement des objets de type « espace ». Il s'agit en fait de gabarit chargé de n'accueillir les objets réels qu'au LoD 5. Cela signifie que les LoD inférieurs à 5 et principalement le LoD 4 servent à la vérification des gabarits pour l'implantation des objets (et systèmes) pas encore totalement conçus. Cette démarche s'inscrit en effet dans un contexte de conception et de raffinement du détail contrairement aux LOD de CityGML définis plutôt pour la généralisation des données [[Borrmann et al., 2014](#)]. Ces LoD sont un moyen de répercuter des modifications apportées à des modèles 3D avec un « niveau de détail » faible sur les niveaux de détail plus fins et ce, de manière paramétrique (par exemple, la modification de l'axe du tunnel se répercute sur les espaces et objets aux LoD plus grands). Ces LoD sont également liés entre eux par l'historique de construction des objets du modèle. Les liens explicites entre ces LoD permettent ainsi de créer des modèles multi-échelles cohérents entre les niveaux.

Par ailleurs, les auteurs affirment qu'un modèle de données neutre qui offre la possibilité de partager une description de la procédure de création des modèles multi-échelles est capable de transmettre les dépendances entre les différents niveaux de détails et permet de maintenir la flexibilité et la cohérence inhérente du modèle [Borrmann *et al.*, 2012]. Par contre, les auteurs émettent certaines réserves. Par exemple, les opérations de modification aux niveaux grossiers ne sont pas toutes facilement répercutables puisqu'elles sont fonction des règles paramétriques (contraintes topologiques par exemple : parallélisme, coïncidence d'objets, verticalité, tangence...) établies par rapport à l'historique de construction des objets plus détaillés : certaines incohérences de répercussion peuvent survenir. Dans ce modèle, un objet n'existe que dans un seul LoD contrairement aux LOD de CityGML. Toutefois, si dans CityGML le lien entre les objets qui composent un autre objet d'un LOD inférieur est un lien (conceptuel) de composition, il est dans ce modèle de Borrmann *et al.* de type paramétrique. Comme pour les LOD de CityGML, la répartition des objets dans les LoD correspond à la réponse proposée pour les analyses supposées pour chaque LoD, c'est-à-dire à une certaine vue portée sur le projet. Ces vues (et donc cette répartition des objets) sont définies de manière générique mais invariante pour un même modèle.

A nouveau, il s'agit d'une proposition intéressante. D'autant plus qu'elle considère directement certains besoins de l'activité de conception. Mais nous pouvons faire la même critique que pour les LOD de CityGML : un seul et unique point de vue est considéré. Même si le détail des objets varie, le tunnel est toujours vu avec un niveau d'abstraction identique. On pourrait imaginer compléter cette proposition par d'autres travaux du même type mais avec une autre vue portée sur le tunnel. Par exemple avec une abstraction permettant de traiter des problématiques de connexion entre la partie tunnel et les stations par exemple. Ainsi, le tunnel ne serait pas considéré de la même manière et l'univers du discours serait différent. Certains éléments des ontologies de domaine utilisées pourraient être communs ainsi que la définition de ces LoD sur le fond. Mais l'application se ferait avec une autre abstraction du projet. C'est cette approche qui manque dans tous les niveaux que nous étudions.

Plusieurs travaux cités dans [Biljecki *et al.*, 2014b] proposent d'autres modifications aux LOD comme par exemple la séparation entre les concepts de LOD, d'échelle et de précision. Sont également citées quelques propositions complémentaires de LOD pour des classes d'objets autres que les bâtiments comme les arbres ou les routes mais uniquement pour la phase d'exploitation. Beaucoup de ces propositions restent ciblées sur la gestion de la modélisation pour la navigation dans le modèle. Elles restent donc basées sur la gestion du visuel du modèle avec une hiérarchie unique des objets en lien avec la croissance du LOD et une unique abstraction de la réalité à modéliser.

5.1.5 Conclusion de l'analyse des LOD

Rappelons que cette analyse se fait dans le contexte de la problématique suivante : quels apports possibles de l'utilisation du concept de LOD pour les projets d'infrastructure ? Et est-il possible de les utiliser dans leur définition actuelle pour définir le contenu des IDM afin de standardiser les échanges de données entre acteurs d'un projet de conception ? Permettent-ils la gestion de la multi-représentation pour la définition du contenu des BIM uses ? Il ne s'agit donc pas d'une critique de CityGML dans son contexte d'utilisation classique. Les analyses décrites ci-dessus portent sur l'utilisation du concept de LOD pour la conception d'infrastructure et pour la définition des IDM. C'est un contexte différent de celui pour lequel les LOD ont été construits au départ.

Tout d'abord, les exemples et figures présentés plus haut pour illustrer le concept de LOD se basent sur l'objet bâtiment. Cela n'implique pas que les LOD ne soient pas applicables aux projets d'infrastructures. Seulement, la norme de CityGML étant sujette à interprétation, le manque d'illustration sur ce

type de projet complique la compréhension et l'application du concept de LOD à ce type d'ouvrages. Comme nous l'avons démontré en nous appuyant sur l'avis de chercheurs qui connaissent bien CityGML et le concept de LOD (Groger, Plumer, Biljecki, Brasebin, etc.) il n'existe pas de définition précise standardisée des LOD. Les LOD de CityGML semblent avoir été définis pour une application générique et ainsi satisfaire un grand nombre de besoins de modélisation du milieu urbain. Par contre nous avons également évoqué les changements de logique pour la répartition des objets dans les LOD ou certains paramètres difficilement applicables (critère d'emprise au sol pour l'exemple de la borne wifi ou de l'arrêt de bus ; voir Tableau A.2 page 244 pour rappel). Les LOD ne peuvent conserver simultanément les rôles de définition de la modélisation des objets et de structuration du modèle d'informations. Lorsque l'on change d'échelle, certains objets apparaissent, d'autres disparaissent ou changent de représentation avec le LOD. Donc tous les objets ne réagissent pas de la même manière. De nombreux paramètres sont à considérer dans la définition du comportement des objets par rapport aux changements de « niveau de détail ». Donc le seul concept de LOD ne suffit pas pour les gérer tous. De plus, nous avons démontré qu'un seul point de vue est considéré dans un modèle CityGML, avec plusieurs manières de détailler le modèle, les cinq LOD. Ce n'est, selon nous, pas suffisant pour une utilisation dans un projet de conception d'infrastructure avec de nombreux acteurs et parties prenantes. Les uns et les autres considèrent des échelles similaires mais défendent pour chacune des visions différentes de l'information selon leurs besoins. Par ailleurs, les LOD seuls ne peuvent pas être le support de la structuration de l'information d'un projet de conception. Les sous-concepts qu'ils contiennent sont trop liés pour être exploités de manière efficiente. Évoquons en dernier lieu le fait que certains pays comme la Chine ou les Pays-Bas développent leurs propres standards à partir de CityGML, en précisant certains points tels les textures à appliquer ou des modifications entre la taille des objets et les LOD [Biljecki *et al.*, 2014b]. Cela montre bien que les corrélations qui lient les sous-concepts inclus dans les LOD ne satisfont pas l'ensemble des utilisateurs de CityGML. Selon nous, l'objectif premier des niveaux de détail est de gérer la multi-représentation selon les besoins et non pas la structuration de l'information ou la décomposition des objets. Ces éléments sont à gérer autrement, notamment au travers des abstractions et de la définition des ontologies de domaine. Notre redéfinition des LOD à la fin de cette partie prend en compte cet argument.

Rappelons tout de même que l'objectif premier de CityGML était de permettre la modélisation de l'existant, du visible. Aller plus en détail dans la définition et la cohérence spatio-sémantique de CityGML n'intéresse pas pour le moment la communauté « SIG » (entretien avec l'auteur [Biljecki *et al.*, 2014b]). C'est également pour cette raison que nous avons souhaité nous inspirer des nombreux concepts inclus dans les LOD pour en proposer une redéfinition pertinente en projet de conception d'infrastructure urbaine. Le CityGML reste la seule norme permettant de modéliser le milieu urbain en 3D avec des informations géométriques et sémantiques sur les objet, et cela de manière interopérable et basée sur un modèle de données ouvert et normalisé [Groger et Plumer, 2012]. Une nouvelle version de CityGML est en cours de préparation, avec notamment une extension du concept de LOD [Machl, 2013]. Certaines extensions (appelées ADE, voir section A.2.2 page 243) vont également permettre d'étendre le champ des possibles de CityGML. Les nombreux travaux sur le CityGML et les LOD montrent l'intérêt de plusieurs communautés pour ce standard et son concept phare. Mais la modification du concept de LOD semble indispensable pour répondre aux besoins changeants des diverses professions qui utilisent ou seront amenées à utiliser CityGML ainsi que le concept de LOD. Il s'agit notamment des acteurs concernés par les projets d'infrastructures et d'aménagement urbain.

Nous apportons ici une analyse détaillée du concept de LOD de CityGML. Bien que ce concept paraisse simple en première approche, nous venons de démontrer qu'il intègre à la fois des considérations

sur la représentation de l'information et sur la structuration même de cette information. Par conséquent, nous avons travaillé à identifier chaque élément implicite de ces LOD. Nous allons maintenant nous intéresser aux niveaux de développement, utilisés dans un contexte de conception. Bien que le contexte de leur utilisation change, nous allons détecter des problématiques similaires aux LOD. Par contre, ces niveaux de développement, qui pourtant traitent également de l'information sémantique, géométrique et visuelle, n'impactent pas directement la structuration de l'information ni la présence des objets dans une modélisation en fonction des besoins. Ces éléments sont décrits en dehors des LODt. Ainsi, la partie ci-dessous à propos des niveaux de développement de la conception reste moins conséquente que la précédente.

5.2 Le concept de Level Of Development pour la construction

Ce concept de niveau de développement est utilisé dans le milieu de la construction et plus spécifiquement dans celui du bâtiment. Ce « Level Of Development » est également appelé Level of Detail : de ce fait, la compréhension n'est pas facilitée. Bien souvent, cette confusion opère et aucune distinction n'est faite entre ces deux concepts. Pour preuve, lorsque ce concept est évoqué dans des conférences professionnelles, le conférencier dira souvent : « le niveau de détail, ou développement peu importe. . . ». Justement non, cela importe. Énormément. Ce sont deux concepts différents avec un historique et des fondements issus de la réflexion et des besoins de deux communautés distinctes. Il ne faut donc pas les confondre pour notre analyse, bien qu'ils véhiculent des sous-concepts communs.

De plus, un récent courant anglo-saxon propose un abandon des Level Of Development au profit de deux concepts distincts : les *Levels Of model Information* (LOI) et les *Levels Of model Detail* (LOD). La hiérarchie par niveaux est conservée mais les sous-concepts véhiculés par les Level Of Development sont répartis dans ces deux concepts qui gèrent l'information de conception de manière séparée comme l'explique la définition ci-dessous. Ces concepts de LOD et LOI sont évoqués dans le [PAS 1192-2, 2013] de la BSI³ et définis comme suit :

- levels of model detail (LOD) : description graphique des modèles à chaque phase ;
- levels of model information (LOI) : description non-graphique des modèles à chaque phase.

Cette répartition de sous-concepts permet de gérer la géométrie et la sémantique ou partie attributaire séparément. De manière opérationnelle, le BIM Toolkit [Bsi, 2015] permet d'utiliser de concept de niveau de développement en décrivant le LOD et le LOI pertinent pour chaque phase.

Pour faciliter la compréhension de cette partie sur les niveaux de développement, nous écrirons LODt, sans distinguer si il s'agit des LODt ou de l'ensemble proposé par la BSI et constitué des LOI et des LOD (différents des LOD de CityGML). Cet ensemble est appelé Level Of Definition dans le [PAS 1192-2, 2013] : nous n'évoquerons pas non plus ce concept directement pour conserver l'acronyme LODef pour un autre concept décrit ci-dessous. LODt évoque donc le concept de niveau de développement.

5.2.1 Définitions et utilisations du concept de niveau de développement

Dans ce titre, le mot *Définitions* est volontairement au pluriel pour évoquer la diversité des définitions du concept de LODt. Nous allons donc traiter ici les courants dominants de la définition des LODt pour la construction (majoritairement, ces définitions sont relatives aux projets bâtimentaires). Pour les projets de construction, ces niveaux de développement sont définis dans [Volk et al., 2014] comme « A frequently mentioned concept to describe information richness of BIM objects », ce qui correspond bien à ce que nous appelons Level Of Development et non pas Level Of Detail de CityGML.

3. British Standard Institution : entité qui produit notamment les PAS 1192, voir section 2.2.2 page 47.

De plus, ce concept n'est pas vraiment nouveau, seule la définition a changé au cours du temps : elle s'est affinée. Le *niveau de conception* dont parle [Morand \[1994\]](#) est défini à cette époque par trois niveaux (cette définition reste la même pour tous les domaines métiers) :

- niveau 0 : choix des partis techniques ;
- niveau 1 : pré-dimensionnement des objets techniques ;
- niveau 2 : définitions de détails, optimisation, réalisation des plans d'exécution.

Ces niveaux correspondent aux grandes étapes de la conception évoquées dans la loi MOP et observées dans la pratique. On les retrouve d'ailleurs chez d'autres auteurs de l'époque cités par [Morand \[1994\]](#).

Plus récemment, quelques exemples de définition de « Level Of Development » (généralement notés et appelés comme les Level Of Detail) sont évoqués dans cette étude très complète « Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - literature review and future needs » de [Volk et al. \[2014\]](#). L'ensemble des définitions de cet article n'est pas exhaustif et prend en compte également les niveaux de détail liés aux relevés et à la modélisation de l'existant (pour rappel, cet article de [Volk et al. \[2014\]](#) traite du BIM principalement pour les constructions existantes). Le Tableau 5.3 synthétise une majorité des définitions existantes des LODt. La définition de [Leite et al.](#) (deuxième colonne) n'est pas proposée comme une définition universelle mais simplement à titre d'exemple. Nous avons conservé ces termes en anglais pour ne pas introduire de glissement sémantique dans la définition de chaque niveau : les termes ou phases *concept* ou *detailed design* par exemple ne correspondent pas exactement aux phases telles que définies en France. Dans ce tableau, nous remarquons tout d'abord que toutes les définitions ne couvrent pas de manière aussi large l'ensemble des phases d'un projet de conception : une seule définition considère toutes les phases de l'esquisse au projet en exploitation. Nous remarquons également que pour quatre définitions sur six, cinq LODt sont communs (lignes du tableau) bien qu'elles ne soient pas totalement identiques : LODt 100 à 500 qui couvrent les phases « d'avant projet sommaire » à « tel que construit » (ou récolement). Notons enfin que la définition qui couvre le plus largement les phases d'un projet est celle du PAS 1192 (le « Level Of model Definition » évoqué dans cette colonne 5 regroupe les LOD et LOI évoqués plus haut). D'autres définitions existent, adaptées à des contextes plus locaux : elles sont présentes par exemple dans les BIM Execution Guide de certaines villes. Elle ne peuvent être considérées ici puisque leur définition n'existe que dans des contextes locaux et ne font pas l'unanimité au niveau international.

TAB. 5.3 – Tableau des différentes définitions du concept de LODt (complété à partir du travail de [\[Volk et al., 2014\]](#)).

Croissance du LODt	[Leite et al., 2011]	[AIA, 2013a] ; [Mthojgaard, 2015]	[BIMForum, 2014]	[PAS 1192-2, 2013] (appelés Level Of model Definition) / [BIMProtocol, 2013]	[Eastman et al., 2011]	[Bedrick et Davis, 2012] et [Bedrick, 2008]
↓	X	X	X	brief / brief	X	X
	X	100	100	concept / concept	X	conceptual
	approximate geometry	200	200	design / developed design	schematic design	approximate geometry
	precise geometry	300	300, 350	definition / production	detailed design	precise geometry
	fabrication	400	400	build and commission / installation	fabrication	fabrication
	X	500	500	handover and close-out / as constructed	X	as built
	X	X	X	operation and in-use / in use	X	X

Certains travaux listés par [Volk et al. \[2014\]](#) et non évoqués dans le Tableau 5.3 définissent les LODt

comme les spécifications des livrables à produire (LODt « as design, as planned, as built, as used »). Nous retrouvons également ici l'idée de définir des niveaux de développement de manière absolue avec le soucis que tous les objets s'y réfèrent. En conséquence de quoi, de manière opérationnelle, le moyen d'exploiter ces LODt est d'assigner à chaque objet (ou groupe d'objets), pour chaque phase, un LODt spécifique à atteindre. Si les LODt sont ainsi assimilés à des phases du projet comme c'est parfois le cas, les définitions données par exemple dans [BIMForum, 2015] ne sont pas exploitables : cette définition par phase impose immobilisme et rigidité puisqu'elle propose de gérer l'avancée de la conception de manière linéaire et séquentielle basée sur la production des livrables et non sur les objectifs de réponse aux exigences. Une maquette numérique pour la phase EXE peut très bien être modélisée avec des objets au LODt 200 alors que le LODt de cette phase serait plutôt par définition le LOD 400. Dans la Figure 5.11, les deux extraits de la maquette numérique abordent des LODt différents. Il serait possible de les identifier comme phase AVP à gauche et phase PRO à droite lorsque la modélisation est corrélée au LODt. Toutefois, la figure de droite peut effectivement être le modèle du PRO mais également la modélisation de la phase EXE avec un LODt faible. Ainsi, cette définition des LODt ne convient ni à notre contexte d'ingénierie concurrente ni à une utilisation de la multi-représentation. Plusieurs raisons à cette différence de détail dans la modélisation sont proposées :

- le LODt ne correspond pas à une phase donc les LODt de tous les objets pendant une phase ne sont pas homogènes ;
- l'information disponible ne permet pas de modéliser tous les objets aux LODt demandés pour cette phase ;
- la modélisation ne nécessite pas ce niveau de développement, même s'il est disponible pour tous les objets à modéliser.

Ces arguments traduisent le contexte actuel de modélisation avec des outils et des concepts qui ne permettent pas, sans des efforts énormes de, modéliser de plusieurs manières les mêmes objets pour répondre à des exigences ou besoins différents. Le LODt peut être considéré comme un indicateur utilisé soit comme objectif à atteindre, soit comme objectif de conception. Les concepts combinés de LOI et LOD permettent les mêmes avantages mais de manière plus précise et décorrélée. Pour rendre ce concept opérationnel, il devient donc obligatoire de définir précisément les informations géométriques et sémantiques à fournir pour chaque LODt et pour chaque objet comme cela a déjà été initié par [BIMForum, 2015 ; PAS 1192-2, 2013 ; Bsi, 2015].



FIG. 5.11 – Mise en évidence de la différence du niveau de conception entre la phase AVP et PRO. /projet L2

Tous les niveaux du concept de LODt s'appliquent directement à un objet et pas au modèle entier, même si le LODt est défini dans l'absolu par rapport au projet. Il est en ce point fondamentalement différent du LOD. Également en opposition avec les LOD de CityGML, le concept de LODt est héréditaire sur ses sous-objet, ce qui n'était pas le cas des LOD qui sont un moyen de représenter de plusieurs manières un même objet. Donc si un objet en passant au LODt supérieur devient un ensemble de plusieurs objets, tous ces sous objets héritent du LODt de cet objet principal, c'est à dire de sa précision géométrique et de sa sémantique. Par ailleurs, le LODt supérieur est généralement défini par ce qui décrit

le LODt précédent en ajoutant un complément d'information (voir par exemple [BIMForum, 2015] et la partie surlignée de la Figure 5.12). Ainsi, la croissance du LODt d'un objet se traduit également par une spécialisation, en opposition avec la généralisation portée par les LOD de CityGML (voir Figure 5.13).

4.1 Fundamental LOD Definitions ³

LOD 100	The Model Element may be graphically represented in the Model with a symbol or other generic representation, but does not satisfy the requirements for LOD 200 . Information related to the Model Element (i.e. cost per square foot, tonnage of HVAC, etc.) can be derived from other Model Elements.
LOD 200	The Model Element is graphically represented within the Model as a generic system, object, or assembly with approximate quantities, size, shape, location, and orientation. Non-graphic information may also be attached to the Model Element.
LOD 300	The Model Element is graphically represented within the Model as a specific system, object or assembly in terms of quantity, size, shape, location, and orientation. Non-graphic information may also be attached to the Model Element.
LOD 350	The Model Element is graphically represented within the Model as a specific system, object, or assembly in terms of quantity, size, shape, orientation, and interfaces with other building systems. Non-graphic information may also be attached to the Model Element.
LOD 400	The Model Element is graphically represented within the Model as a specific system, object or assembly in terms of size, shape, location, quantity, and orientation with detailing, fabrication, assembly, and installation information. Non-graphic information may also be attached to the Model Element.
LOD 500	The Model Element is a field verified representation in terms of size, shape, location, quantity, and orientation. Non-graphic information may also be attached to the Model Elements.

FIG. 5.12 – Définition générale des Level Of Detail (de type LODt), d'après [BIMForum, 2015].

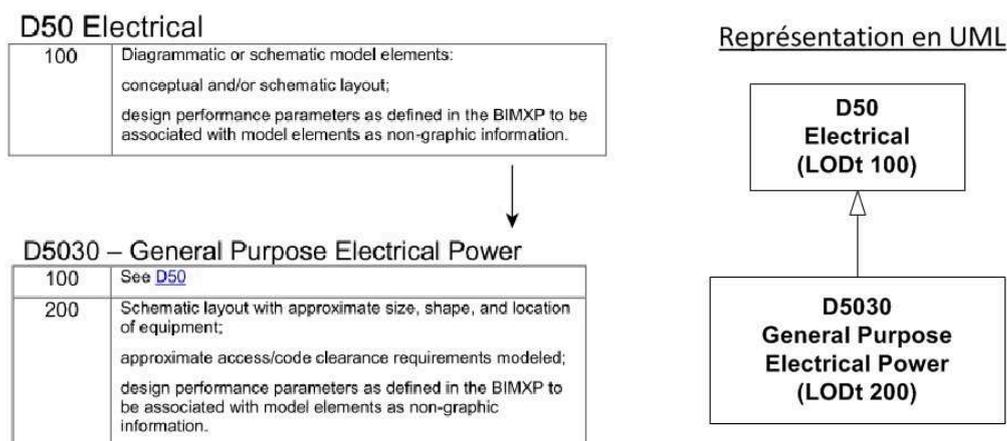


FIG. 5.13 – Illustration sur un exemple du lien entre croissance du LODt (partie gauche, extraite de [BIMForum, 2015]) et spécialisation de l'objet (partie droite).

Pour l'AIA [2013], les LODt correspondent à l'augmentation du détail dans le modèle suivant les différentes phases. De 100 à 300 il s'agit des phases de conception, 400 de la phase de construction et 500 de celle d'exploitation. La croissance du LODt correspond à une augmentation de la quantité d'information communiquée. Pour BIM Forum [BIMForum, 2015], qui s'est au départ basé sur la proposition de l'AIA, il existe de nombreux niveaux intermédiaires entre ces LODt définis par 100, 200, 300, 400 et 500. Par contre, un certain LODt ne peut être considéré comme atteint que lorsque les précédents sont également atteints [BIMForum, 2015] (principe d'hérédité évoqué ci-dessus). Les LODt sont donc dans ces définitions des objectifs à atteindre pour passer au LODt suivant. Il est toutefois spécifié dans [BIMForum, 2015] qu'un LODt ne correspond pas à une phase; ce que l'on retrouve également dans la proposition du ministère des transports et de la communication du Portugal évoquée par Costa [2011]. Le groupe de travail de [BIMForum, 2015] a identifié la nécessité d'un LODt qui définirait les éléments du modèle suffisamment développés pour permettre la coordination entre les

disciplines. Les exigences de cette définition des objet sont supérieures à celles du LODt 300 mais ne sont pas aussi élevées que celles du LODt 400, d'où la proposition d'un LODt 350 intermédiaire, reprise dans le guide de l'Université de Penn State [Kreider et Messner, 2013]. Les derniers documents de l'AIA ne comprennent pas le LODt 350, mais le guide [AIA, 2013] y fait référence.

Dans [Leite *et al.*, 2011], les niveaux étudiés sont des Level Of Detail, notés LoD, mais ils véhiculent bien le sens de « niveau de développement » (LODt). Les auteurs évoquent également d'autres niveaux comme les « Level Of Approximation » ou les « Level Of Representation ». Nous n'allons pas traiter ces derniers ici puisque les idées ou concepts qu'ils véhiculent seront évoqués dans notre proposition de niveaux pour notre MCD. Toutefois, cela montre la nécessité d'extraire du LODt (ici appelé LoD) certains sous-concepts afin de les gérer séparément. Les LoD dont il est question dans cet article sont également vus comme un objectif à atteindre pour le management de projet et donc pour les équipes de production. Ils participent de ce fait au suivi de l'avancement de la conception. C'est également comme cela qu'ils sont considérés dans [Manziona, 2013] : les LODt participent à l'évaluation de l'avancement du projet.

Dans ce contexte, ils donnent une information sur la manière de traiter, par exemple, les clashes détectés. Ceux-ci n'ont pas autant de sens lorsqu'ils sont détectés entre des objets au LODt 100 ou au LODt 400. Les clashes sont à considérer avec précaution lorsqu'ils sont entre des objets de LODt faible (100 par exemple) ou entre des objets de LODt différents car ils ne sont pas tous pertinents : beaucoup vont disparaître avec l'avancée de la conception. En effet, un LODt faible signifie que la conception n'est pas très avancée et donc que l'implantation ainsi que la taille de l'objet n'est pas précise. Un clash entre des objets de LODt différents nécessite une analyse au cas par cas, objet par objet ou classe d'objet par classe d'objet (d'où l'intérêt évident d'une structuration sémantique de l'information). Nous confirmons ainsi l'intérêt de distinguer le détail géométrique et visuel du détail informationnel, respectivement les LOD et LOI de la BSI⁴. L'indication du LODt d'un objet permet ainsi de suivre l'avancée de la conception, de fixer des objectifs clairs, de faciliter l'analyse des modèles 3D et de prendre des décisions avec des informations fiables. Il ne s'agit pas uniquement de savoir si l'objet est entièrement défini ou non mais plutôt de pouvoir évaluer à quel point les informations qui le décrivent sont fiables ou validées.

Dans [BIMForum, 2015], le LODt est défini comme permettant de mieux connaître la précision avec laquelle sont modélisés les objets. En effet, classiquement pour chaque phase du projet, une précision implicite, liée à l'échelle des livrables, contraint la modélisation (ou plutôt le dessin) des objets. Mais cela n'est plus totalement vrai pour les objets modélisés en trois dimensions puisqu'il n'existe plus d'échelles. Plusieurs précisions des données peuvent exister simultanément dans un même modèle. Après l'affectation d'un LODt par phase et par objet (ou par domaine métier), il reste à définir les attributs correspondent [BIMForum, 2015] (voir Tableau 5.4, deuxième colonne). Ainsi, on note une incohérence dans le sens où la définition des LODt est basée sur le contenu classique des livrables de chaque phase mais pour chaque objet il est possible de réaffecter un LODt différent. Il s'agit en fait d'une adaptation à chaque projet, les besoins en information étant variables. C'est un premier pas vers une modélisation et une définition des besoins en information basés non plus sur les livrables à produire mais bien sur les exigences auxquelles la conception doit apporter une réponse. Par extension, on retrouve dans [Kriphal et Grilo, 2012], une comparaison entre les besoins en LODt pour la conception et pour la construction, cette dernière phase n'ayant pas toujours les besoins les plus précis en information par comparaison avec la phase de conception.

Les différentes définitions des LODt sont appliquées plus ou moins strictement sur projet. Leur définition par objet ou par modèle (ensemble d'objets d'un même domaine métier) peut être demandée dès la réponse à l'appel d'offre. Il paraît donc indispensable de caractériser, au moins partiellement, les LODt de chaque objet ou modèle de manière générique pour une réutilisation sur projet. Cette

4. BSI : British Standards Institution.

TAB. 5.4 – Exemple extrait de [BIMForum, 2015].

	Relevant Attribute Tables	SD			DD			CD		
		Date			Date			Date		
		LOD	MEA	Notes	LOD	MEA	Notes	LOD	MEA	Notes
SUBSTRUCTURE										
Foundations	A, B Concrete; A, B Wood; A, B Masonry; A, B Precast Concrete									
Standard Foundations	A, B Concrete; A, B Wood; A, B Masonry; A, B Precast Concrete									
Wall Foundations	A, B Concrete; A, B Wood; A, B Masonry; A, B Precast Concrete									
Column Foundations	A, B Concrete; A, B Wood; A, B Masonry; A, B Precast Concrete									

Légende :

SD : Schematic Design

DD : Detailed Design

CD : Construction Design.

Les MEA sont les acteurs responsables de ces objet et devant fournir les objets au LODt défini (notés LOD dans ce tableau).

structuration préliminaire permet par exemple de faciliter l'échange des données entre acteurs. Les LODt font partie de la définition des BIM uses et facilitent en théorie la description du contenu des IDM.

Exploitation des LODt dans la conception d'infrastructures : exemple de la détection de clashes

Dans leur travail, Leite *et al.* [2011] ont étudié les conséquences d'une modélisation dans une maquette 3D d'objets avec différents LODt. Ils ont basé leur étude sur deux projets de bâtiment. Nous n'avons pas d'étude équivalente, semble-t-il, pour les projets d'infrastructures. Ce travail de recherche exprime plusieurs conclusions au sujet du concept de LODt. Tout d'abord, contrairement à notre intuition, le fait de modéliser avec un LODt plus élevé ne favorise pas la détection de clashes. Cela peut même créer des clashes dits *faux positifs* : comme le montre la Figure 5.14, pour un seul clash entre deux objets, nous avons en fait une détection automatique de deux clashes. Ces deux objets de l'éclairage sont nécessairement liés dans la réalité : deux clashes sont identifiés (figures gauche et droite) pour un seul clash réel entre la ventilation et l'éclairage. Un des deux clashes est un *faux positif* dû à la trop grande décomposition des objets du modèle. Par conséquent, une modélisation trop précise, avec un découpage trop important des objets, peut allonger le temps de traitement (temps machine et temps humain d'analyse) des clashes. On peut imaginer résoudre partiellement ce type de problème avec l'introduction d'un gabarit pour l'objet principal sans modéliser les sous-composants. Cela signifie bien de proposer une modélisation voire une structuration de l'information spécifique à la réponse à certaines exigences, dont l'élimination des clashes peut faire partie. Selon l'utilisation que l'on fait des données (ici une détection automatique de clashes), la modélisation, donc le détail géométrique mais également le niveau d'abstraction, n'est pas toujours identique au LODt de la conception à un instant *t*.

Par contre, il a également été montré par Leite *et al.* [2011] que certains clashes n'étaient identifiés que par la détection automatique. C'est le cas des clashes trop bien cachés dans l'ensemble du modèle 3D pour qu'un humain ne les détecte en un temps raisonnable. Par contre, d'autres n'étaient détectés que par les experts. Donc, selon l'utilisation des données mais également selon l'acteur qui les exploite, la modélisation change alors que le LODt (ou couple LOD - LOI) reste identique. La détection de clashes par un expert nécessite des informations plutôt sémantiques et une représentation adaptée, alors que pour les détections automatiques la géométrie devient l'élément indispensable. Notons tout de même que dans ce cas, la sémantique permet de cibler la détection des clashes sur certains types d'objets et de traiter ces clashes. Par contre nous avons vu que la décomposition des objets la plus fine n'est pas

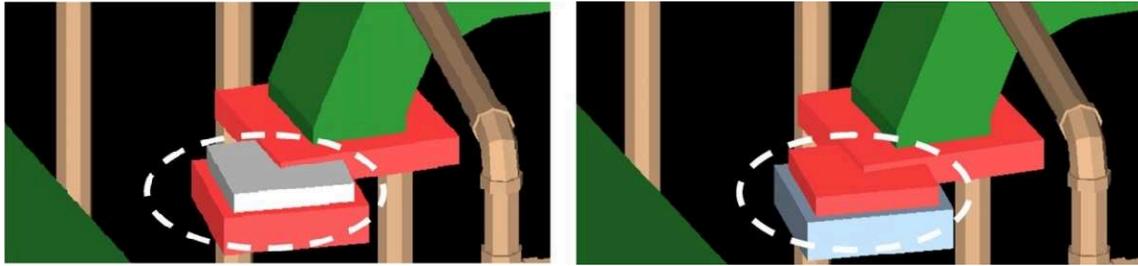


FIG. 5.14 – Exemple de génération de clash faux positifs due à une trop grande décomposition des objets. Figure extraite de [Leite et al., 2011].

toujours la plus efficace. Il faut donc cibler quels types de clashes doivent être détectés, pour quel objectif et donc avec quels LODt des objets. Rappelons l'exemple donné dans [Leite et al., 2011] : les chemins de câbles ne sont pas modélisés alors que ce complément serait utile pour améliorer la performance de détection humaine des clashes. Il faudrait donc procéder à une distinction préalable entre les besoins de l'homme et de la machine, pour des tâches différentes, selon leurs aptitudes respectives. Ainsi, la coordination 3D apparaît comme un sujet vaste à traiter avec, en amont de cette analyse, un travail significatif de définition des besoins en LODt pour chaque objet. Il est à noter que le coût des faux positifs est facilement compensé par le temps non passé par un spécialiste pour la détection de clashes évidents via un outil de détection automatique. A noter également que les outils actuels, par rapport à 2011, date de sortie de cette étude de Leite et al., sont plus performants pour identifier et gérer les clashes (par exemple, meilleure intégration de la sémantique des objets) ce qui permet de supprimer certains faux positifs par exemple.

Dans un contexte opérationnel, le LODt est généralement vu comme un objectif à atteindre pour les équipes de conception. Les LODt à atteindre pour chaque objet ou classe d'objet peuvent être définis dès le début du projet (dans un *BIM execution plan*) et affinés suivant l'avancement. Nous avons vu toutefois qu'un LODt trop élevé n'est pas nécessairement pertinent pour toutes les utilisations des modèles. Ensuite, le LODt est un concept relatif à chaque objet même si il peut être défini comme objectif d'atteindre un certain LODt pour une phase donnée, pour un domaine métier entier. Le LODt est donc un outil de suivi de l'avancement de la conception et un outil d'aide à la planification des objectifs de conception. Ces niveaux de développement permettent également de renseigner sur la qualité des données lors d'analyses spécifiques ou d'échanges de modèles. Par exemple, si un clash est détecté entre deux objets dont un au moins n'a pas le LODt requis pour la validation de la phase donnée, l'information sur le LODt de l'objet permet de savoir s'il n'a pas de sens à ce niveau d'avancement du projet.

Jusqu'à la prochaine section, les niveaux de détail sont notés LOD mais sont différents des LOD de CityGML.

5.2.2 Analyse et observations sur les LODt

Notre travail d'analyse apporte un premier constat : les LODt ne sont nulle part définis de manière standardisée. Leur utilisation varie et les besoins auxquels ils répondent changent selon la définition que chaque acteur leur donne. Il n'y a pas possibilité d'échanger des informations de manière interopérable en se basant sur ce concept de LODt aujourd'hui mal défini. De plus, le lien avec les standards existants comme les IFC ou CityGML n'existe pas explicitement. Le modèle des IFC permet seulement d'utiliser un concept similaire aux LOD de CityGML mais il ne traite que de la multi-représentation d'un objet et non de sa décomposition sémantique [Plume et Mitchell, 2011] ou de l'avancée de la conception. Du fait du

manque de normalisation de ce concept, les LODt sont alternativement considérés comme des objectifs à atteindre, comme un suivi de la conception ou comme une définition des éléments d'information à échanger. Cela montre une incompatibilité avec les besoins de l'ingénierie concourante, du partage de modèles et de définition commune des IDM au sein d'un projet.

Dans [BIMForum, 2015], les LODt sont décrits pour de nombreux objets du bâtiment. Mais ils le sont pour un certain niveau d'abstraction, pour une certaine vue portée sur le bâtiment, généralement la vue la plus proche de ce qui sera construit. En effet, on retrouve les éléments mur, fenêtre, porte, système de ventilation, etc. Comme le montre la Figure 5.15 pour l'objet *Floor Structural Frame*, la croissance du LODt fait apparaître d'autres objets qui eux n'ont pas forcément de LODt. Tous ces objets appartiennent à un concept général comme ici la structure de plancher qui seule porte un LODt. Ce qui correspond à ce que nous avons appelé un univers du discours et donc un niveau d'abstraction unique. L'univers du discours grossit seulement avec la croissance du LODt. Donc, avant de pouvoir appliquer le concept de LODt, il est nécessaire d'avoir défini la manière dont est modélisé le projet, c'est-à-dire les niveaux d'abstraction utilisés. Ainsi nous rappelons le besoin d'extraire le concept de niveau d'abstraction et d'échelle des LOD (de CityGML) ou LODt. Si nous considérons maintenant les exigences, certaines portent sur des objets et d'autres directement sur des systèmes. Pendant la conception, un système est dimensionné et l'information qui le décrit croît. Ce système s'appuie ensuite sur des objets physiques pour fonctionner. Il faut donc se poser la question de la gestion parallèle des LODt, relatifs à des systèmes pour évaluer la réponse aux exigences qui portent sur ces systèmes, et relatifs aux objets qui composent ces systèmes. Ce point ne semble pas traité dans les définitions actuelles des LODt (ou LOD - LOI). Il l'est encore moins pour les projets d'infrastructures qui comportent une distinction plus floue que pour le bâtiment entre les systèmes, les objets sur lesquels les systèmes s'appuient et les ouvrages fonctionnels qui jouent simultanément ces deux rôles (nous étudierons cela plus en détail dans notre travail de synthèse de ce chapitre en section 6.4).

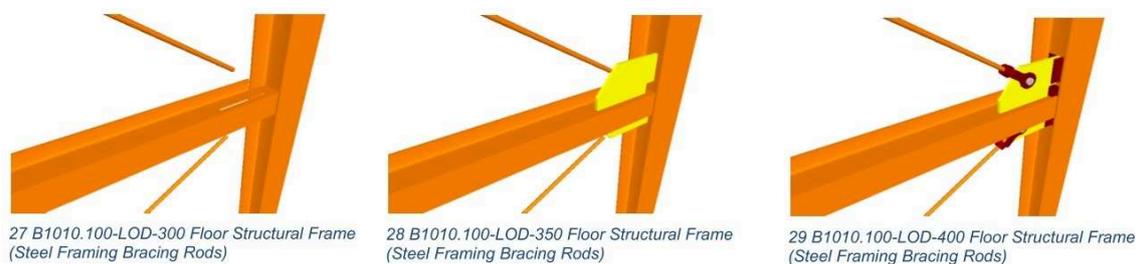


FIG. 5.15 – Représentation de l'avancement du LODt (300, 350 et 400) pour l'objet *Floor Structural Frame*, d'après [BIMForum, 2015].

Les LODt décrivent plusieurs niveaux d'information pour caractériser chaque objet. Mais comme pour les LOD de CityGML, les LODt intègrent plusieurs sous-concepts, implicites ou explicites, qui sont utilisés de manière corrélée (la définition des sous-concepts évoquées se trouve page 119). Pour notre démonstration, nous considérons ici comme LODt la définition des *Level Of model Definition* du PAS 1192-2 [2013] (sept niveaux, voir Tableau 5.3 page 127). Nous appuyons notre choix par les arguments suivants :

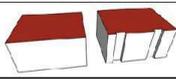
1. il s'agit de la proposition qui couvre le plus largement toutes les phases d'un projet (bien que de ce fait, le niveau du LODt soit lié aux phases) ;
2. il s'agit de la seule proposition qui spécifie traiter des objets d'infrastructures ;
3. la description de l'information spécifique à chaque niveau est précise et déclinée suivant : la représentation graphique, le contenu du modèle de manière générale, les sortants attendus, les interfaces identifiées, les contraintes de construction, les coûts (voir tableaux à partir de la page 35 du PAS 1192-2 [2013]).

Notre analyse des sous-concepts constitutifs du LODt est la suivante (voir le Tableau 5.5 en parallèle ; pour rappel, le LOD n'est pas ici celui de CityGML mais bien celui du PAS 1192-2 [2013]) :

- complexité géométrique : la croissance de la complexité géométrique est en corrélation directe avec la croissance du LOD ;
- dimensionnalité : le fait qu'un objet soit défini en deux ou trois dimensions n'est pas explicitement inclus dans le concept de LOD mais est lié à sa géométrie ;
- apparence : il n'y a pas de définition précise de l'apparence d'un objet selon son LODt ; par contre, l'apparence d'un objet est généralement corrélée avec l'avance de la conception : plus un objet est décrit précisément, plus son apparence sera travaillée, complexe (texturage, rendu principalement) ;
- sémantique : spécifier les informations sémantiques d'un objet augmente son LOI : comme le montre la Figure 5.13 page 129, la spécification sémantique est directement liée à la croissance du LOI ;
- présence : les LODt s'appliquent uniquement sur un objet présent dans le modèle et la croissance du LODt n'intervient pas sur la présence ou non d'un objet (nous parlons ici des objets sur lesquels le LODt est appliqué, comme cela est expliqué pour la Figure 5.15) ;
- attributs : les attributs disponibles ou nécessaires pour chaque LODt d'un objet sont explicitement liés au LOI ;

Rappelons que les notions de qualité, de flou ou de complétude de l'information ne sont pas traitées. Elles sont implicitement liées à la phase et aux livrables pour tous les projets. Le LODt les intègre donc implicitement.

TAB. 5.5 – Analyse de 6 sous-concepts des LODt du PAS 1192 (LOD - LOI) avec mise en évidence de leur caractère implicite (-) ou explicite (+) (0 signifie que le concept n'est pas géré par le LOD ou LOI). On retrouve les résultats des LODt de BIMForum en faisant la somme de ces deux lignes.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	présence	attributs
Illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	OUI ou NON	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
Level of model Detail (NBS)	+	-	-	0	0	0
Level of model Information (NBS)	0	0	0	+	0	+

Légende :

- + : le sous-concept est explicitement gouverné par le type de niveau
- : le sous-concept est implicitement gouverné par le type de niveau
- 0 : le sous-concept n'est pas géré par le type de niveau

En traitant deux cas explicites, nous montrons dans le Tableau 5.6 que les besoins en LODt sont variables pour une même phase, pour une même abstraction et pour un même objet selon l'exigence à traiter. Nous considérons pour l'Objet_I mur acoustique les cas de la détection de clashes (exigence de coordination 3D) avec le reste des Objet_I et le cas du dimensionnement de ce mur acoustique (géométrie et propriétés phoniques). Décrivons notre analyse reprise dans le Tableau 5.6 (les colonnes de ce tableau reprennent cinq des six sous-concepts évoqués précédemment et basés sur le travail de Biljecki et al. [2014b] : le sous-concept présence ne figure plus puisque nous avons vu dans le Tableau 5.5 qu'il n'était pas géré par le LODt). Les LODt décrivent le détail informationnel pour les objets déjà sélectionnés au préalable dans l'établissement de l'abstraction faite du projet (éléments des ontologies métiers pertinentes).

Pour le dimensionnement des protections acoustiques :

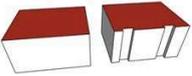
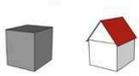
- complexité géométrique : elle ne doit pas être trop élevée pour ne pas fausser les calculs dans l'outil métier (voir précisions en section 7.3 page 174) ;
- dimensionnalité : variable selon l'étape du processus (voir précisions en section 7.3 page 174) ;

- apparence : aucun besoin spécifique ;
- sémantique : les informations sémantiques ne sont pas nécessaires car le dimensionnement acoustique ne considère que l'espace et la géométrie ;
- attributs : ceux décrivant les propriétés acoustiques de l'objet.

Pour la coordination 3D :

- complexité géométrique : complexité géométrique pertinente selon le contexte (exigence à traiter, avancement de la conception, objectifs de la coordination 3D, etc.) ;
- dimensionnalité : volume (3D) ;
- apparence : uniquement pour faciliter la compréhension de la scène 3D pour un opérateur humain (distinction des objets par exemple) ;
- sémantique : nécessaire pour le traitement des clashes et l'évaluation de leur pertinence et de leur criticité ;
- attributs : à spécifier si nécessaire.

TAB. 5.6 – Description des besoins pour les sous-concepts constitutifs des LODt selon deux exigences à traiter : le respect de la réglementation par le dimensionnement des protections acoustiques et la résolution des problèmes de coordination 3D via la détection de clashes entre le mur acoustique et les autres objets du modèle.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	attributs
illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
Dimensionnement des protections acoustiques	Equivalent LOD1 ou LOD2 de CityGML	 ou 	/	/	Voir détail étude acoustique
Détection de clashes (murs acoustiques)	LOD pertinent		/	Maximum possible	/

Ce tableau évoque donc la nécessaire décorrélation entre sous-concepts. Elle existe de manière implicite dans la définition des LOD et LOI dans le « BIM Toolkit » du NBS (National Building Specifications, UK) : un objet peut avoir un LOI (éléments préliminaires de réponse aux exigences comme des performances attendues) mais pas de LOD [Bsi, 2015]. Il évoque également le fait que le niveau d'information pour chaque objet diffère suivant les exigences à traiter et donc que pour un même niveau d'avancement de la conception, les besoins en information ne sont pas fixes : le LODt est vu ici comme une description des besoins en information. La croissance du LODt correspond à une augmentation du nombre de concepts présents dans l'ontologie de l'objet. Dans ce sens, il permet de décrire en partie le contenu des BIM uses. Les deux premières étapes de la modélisation présentées en section 3.2 page 66 permettent justement d'identifier les besoins pour ces sous-concepts par la sélection des ontologies de domaine pertinentes et par la définition des représentations de chaque objet.

Peu importe la manière de définir les LODt, il existe toujours une ambiguïté sur leur utilisation. Ils sont soit entièrement soit partiellement liés aux phases du projet et ils portent de fait sur une vue générique du projet, comme les LOD de CityGML. Nous retrouvons également un univers du discours unique défini pour répondre à un maximum d'acteurs. Cette vision peut sembler suffisante pour un projet de bâtiment mais elle ne l'est pas pour un projet d'infrastructure du fait de la variabilité des points de vue et des échelles de travail à considérer. L'idée de filtrer les objets présents dans le modèle se retrouve dans le BIM Toolkit [Bsi, 2015] : certains objets du BIM Toolkit n'ont par exemple pas de LOD 1 ou de LOI 1. Mais cela reste également une gestion de l'absolu du projet et n'est pas nécessairement relié aux exigences (pour une même phase, un objet peut devoir être présent pour répondre à une exigence mais également être absent pour une autre exigence). Peu importe la définition retenue, ce concept dérive en permanence entre un alignement sur les phases, une définition des objectifs de conception à atteindre ou un suivi dans l'absolu de l'avancement de la conception. Ce concept apparaît donc

difficilement exploitable en l'état pour faciliter l'ingénierie concourante dans des projets de conception. Les objectifs auxquels ce concept répond ne sont pas correctement identifiés pour servir aux activités de modélisation et de gestion de l'information. Nous pouvons affirmer pour conclure que la question à laquelle le concept de LODt semble tenter de répondre n'est pas bien posée. Les LODt sont constitués de sous-concepts qui apportent des fonctionnalités différentes pour gérer l'information uniquement si ils ne sont pas corrélés. Nous montrerons dans notre proposition de redéfinition de ces niveaux, à quelle problématique exactement ils répondent et où ils se placent dans le processus de modélisation et de gestion de l'information.

Nous avons étudié deux concepts principaux qui structurent et définissent l'information caractérisant soit un modèle (un ensemble d'objets) soit chaque objet individuellement. Les LOD du CityGML ne sont pas spécifiquement dédiés aux projets de conception d'infrastructures. Mais les sous-concepts qui les constituent nous apparaissent essentiels dans notre démarche de réflexion. Les LODt ont également montré leur importance et leur potentiel, notamment pour la définition de l'information à échanger. Toutefois, d'autres niveaux existent. Nous allons maintenant analyser les niveaux proposés dans le projet de recherche Communic. Ils ont été définis spécifiquement pour structurer les objets dans des projets de conception d'infrastructures. Rappelons que le projet national MINnD dans lequel une partie de ce travail de thèse s'inscrit est en fait la continuité du projet ANR Communic.

5.3 Le concept de Level Of Definition pour les projets de conception d'infrastructures

Nous traitons dans ce chapitre des différents niveaux existants pour structurer l'information. Nous avons vu plus haut les LOD, les LODt (ou couple LOD - LOI). Nous allons voir ci-dessous un autre type de niveau : les LODef ou *niveaux de définition* (Level Of Definition). Voici tout d'abord quelques définitions de ces LODef :

[Groupe Structuration de Données, 1991] : « Les niveaux de définition qualifient les descriptions et les représentations sur l'objet en cours de conception, en fonction de l'état d'avancement de cette conception ». Ils peuvent être variables selon les métiers mais c'est principalement l'échelle géométrique qui est utilisée comme critère de pertinence. Donc la représentation est liée au développement de la conception : nous avons expliqué précédemment pourquoi cette vision corrélée entre représentation visuelle, informations de conception et échelle ne pouvait être utilisée aujourd'hui de manière aussi contrainte.

[PAS 1192-2, 2013] : le *level of model definition* définit le minimum de détail pour chaque modèle dont les équipes ont besoin. Pour chaque *level of model definition* les LOD et LOI de chaque objet sont déterminés. Ces niveaux montrent une corrélation forte avec les différentes phases du projet.

[Communic L1, 2010] : proposition d'une décomposition par « entité fonctionnelle, métier, système transverse, élément de construction et phases du cycle de vie. » Ensuite, selon chaque type de décomposition, il faut adapter le « niveau de détail » des objets considérés. « Ces découpages doivent être cohérents entre eux et chaque partenaire doit pouvoir organiser et visualiser les données selon sa propre discipline, sans remettre en cause les autres découpages ».

La proposition du projet Communic est la seule qui se rapproche d'une proposition par abstraction, par considération de différentes vues portées sur un projet selon les besoins de modélisation et d'analyse de l'information. Le « niveau de définition » signifie littéralement à quel niveau d'abstraction est défini ou décrit l'ouvrage. La structuration de l'information en niveaux proposée dans les livrables du projet de recherche Communic se base sur le concept de Level Of Definition que nous noterons LODef, pour rester

en cohérence avec les autres notations de niveaux, sans pour autant évoquer une équivalence de valeur entre ces concepts de *niveau*. Elle est proposée « Afin de faciliter la manipulation des informations et de traiter des problématiques globales sans se perdre dans les détails » [Communic L1, 2010]. Il s'agit d'une conceptualisation proche de celle des LOA. Ces LODef permettent de choisir quel est le niveau « le plus adapté à la vision de l'ouvrage que l'on veut obtenir. [...] Ces découpages ont un impact majeur sur l'organisation du projet, sur l'efficacité du travail, et donc sur les processus collaboratifs. Ils engagent les partenaires à collaborer et à se concentrer sur les mêmes objectifs, même s'ils travaillent avec des vues et des métiers différents. Cela permet de faciliter la validation directe d'objets ou de groupes d'objets, au lieu de continuer à valider des plans 2D (vues partielles d'un modèle global) » [Communic L1, 2010]. La suite de la proposition de LODef comprend des niveaux de détail pour chaque LODef qui définissent la précision de description de chaque objet identifié pour chaque LODef. Ces niveaux de détail sont utilisés pour faciliter la compréhension du découpage du projet pour les raisons suivantes : « Un ouvrage de génie civil de plusieurs dizaines de kilomètres de long comprend un nombre d'objets tel qu'il est impossible de :

- les envisager tous au début d'une étude ;
- les représenter tous de manière compréhensible par une seule vue de la maquette. » [Communic L1, 2010]

Dans le projet Communic [Communic L1, 2010] il existe six niveaux de définition (également appelés « niveaux d'objet »). Ils sont définis ci-dessous et présentés dans la Figure 5.16 :

- N0 : décrit l'ouvrage dans son ensemble : données générales, dossiers généraux produits, informations actualisées en matière de coûts ou de délais, documents contractuels généraux
- N1 : entités (ou ouvrages) fonctionnelles : ouvrages particuliers aux projets d'infrastructures ; les exemples de ce type d'éléments du MCD sont : autoroute, ouvrage hydraulique, ligne électrique ou encore les rétablissements des communications (infrastructures) perturbées par l'infrastructure en projet ;
- N2 : métiers ou nature des travaux pour réaliser chaque ouvrage fonctionnel : on va donc en retrouver plusieurs dans différents ouvrages fonctionnels du N1 ; on pourrait ajouter ici une décomposition spatiale générique relative à chaque métier ;
- N3 : ouvrages élémentaires : peut être un tablier, une pile de pont, une culée, un remblai, etc. ;
- N4 : dispositions constructives : une pile est composée de semelle, fût, chevêtre ;
- N5 : constituants spécifiques : éléments quantifiables comme des matériaux ou composants type ferrailage.

Remarque : Les niveaux N0 à N2 sont génériques et applicables à tout projet [Communic L1, 2010]. Toutefois, cette structuration en niveaux de définition ne peut être définie entièrement de manière unique pour tous les projets et ouvrages. Elle dépend de :

- la taille de l'ouvrage (centaines de mètres ou centaines de kilomètres).
- l'organisation de conduite du projet, sa méthode de réalisation et sa décomposition en sous-ouvrages élémentaires.

Cette proposition de niveaux, à compléter par un niveau de détail pour chaque objet, est illustrée par la Figure 5.17.

Passons à l'analyse de ces niveaux proposés suite au projet de recherche Communic.

Le premier élément important de cette proposition se trouve dans l'introduction du concept d'« entité fonctionnelle » (N1). Une infrastructure est composée de ces éléments qui répondent à des grandes fonctions du projet. Ces entités correspondent pour la plupart à des espaces clés du projet : elles ont donc un rôle à la fois fonctionnel et spatial. Ensuite, cette décomposition comprend des points communs avec les vues préconisées par l'ingénierie système proposées par Krob [2009] (voir section 4.2 page 90). La différence fondamentale se trouve dans la hiérarchie des LODef de Communic. Notre précédent

Hiérarchie des Niveaux

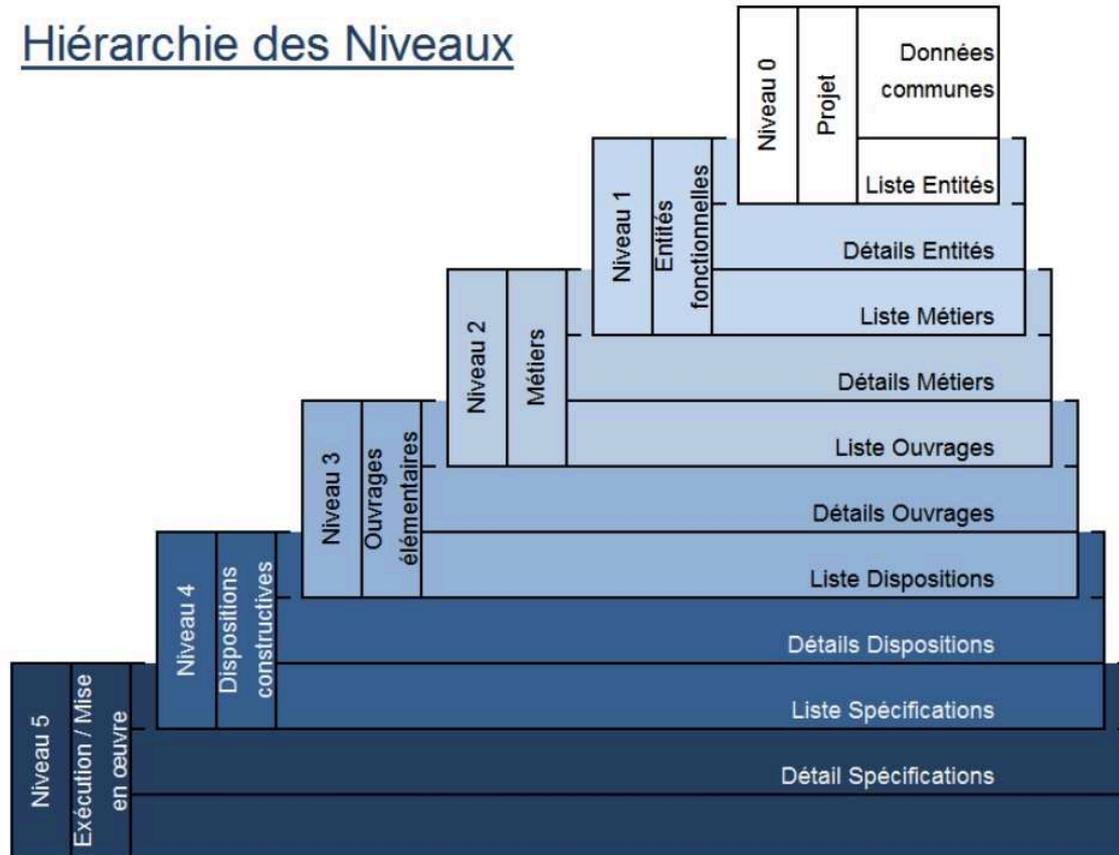


FIG. 5.16 – Hiérarchie des niveaux d'objets du projet Communic (ou niveaux de définition LODef) [Communic L1, 2010].

travail de réflexion au travers de l'ingénierie système nous a indiqué qu'une telle hiérarchie entre ces décompositions n'est pas pertinente. Par ailleurs, la correspondance avec le concept de niveau d'abstraction n'est pas conservé avec cette définition de LODef. Les LODef sont en fait à mi-chemin entre une décomposition hiérarchique du projet et un découpage relatif au niveau d'abstraction considéré. Un même concept ne peut gérer simultanément ces deux idées fondamentales dans la gestion et la modélisation de l'information.

Les niveaux N3 *ouvrages élémentaires*, N4 *disposition constructive* et N5 *constituants spécifiques* illustrent une croissance du détail dans la description des objets. Cette utilisation, illustrée par la Figure 5.17, permet de proposer plusieurs décomposition et abstractions en sélectionnant, par rapport aux exigences à satisfaire ou à vérifier, les métiers présents dans l'arborescence. Ces trois niveaux correspondent plutôt à la vue organique de l'ingénierie système évoquée dans la partie précédente. Elle est, de plus, fortement représentative des concepts présents dans les ontologies de domaine. La combinaison de LODef (N3 à 5) et de niveau de détail permet contrairement aux précédents niveaux (LOD et LODt) de gérer séparément la notion de point de vue (ou de niveau d'abstraction) porté sur le projet pour le modéliser, et le détail pour décrire ces objets. Il nous apparaît comme seul problème dans cette proposition la hiérarchie entre les niveaux N1, N2 et N3, 4, 5. Supprimer cette hiérarchie permettrait de décomposer le projet avec un découpage organique (N 3 à 5) différent selon le métier ou le niveau d'abstraction porté sur le projet (N1 ou N2). Ainsi, cette proposition de LODef doit également être modifiée pour être exploitable en cohérence avec notre problématique de structuration de l'information selon l'exigence à traiter. On retiendra de cette proposition la possibilité d'exploiter les ontologies de domaine pour définir ces décompositions.

Exemple de structuration Les schémas ci-dessous illustrent la logique de cette structuration en objets par niveaux et le caractère transversal des systèmes.

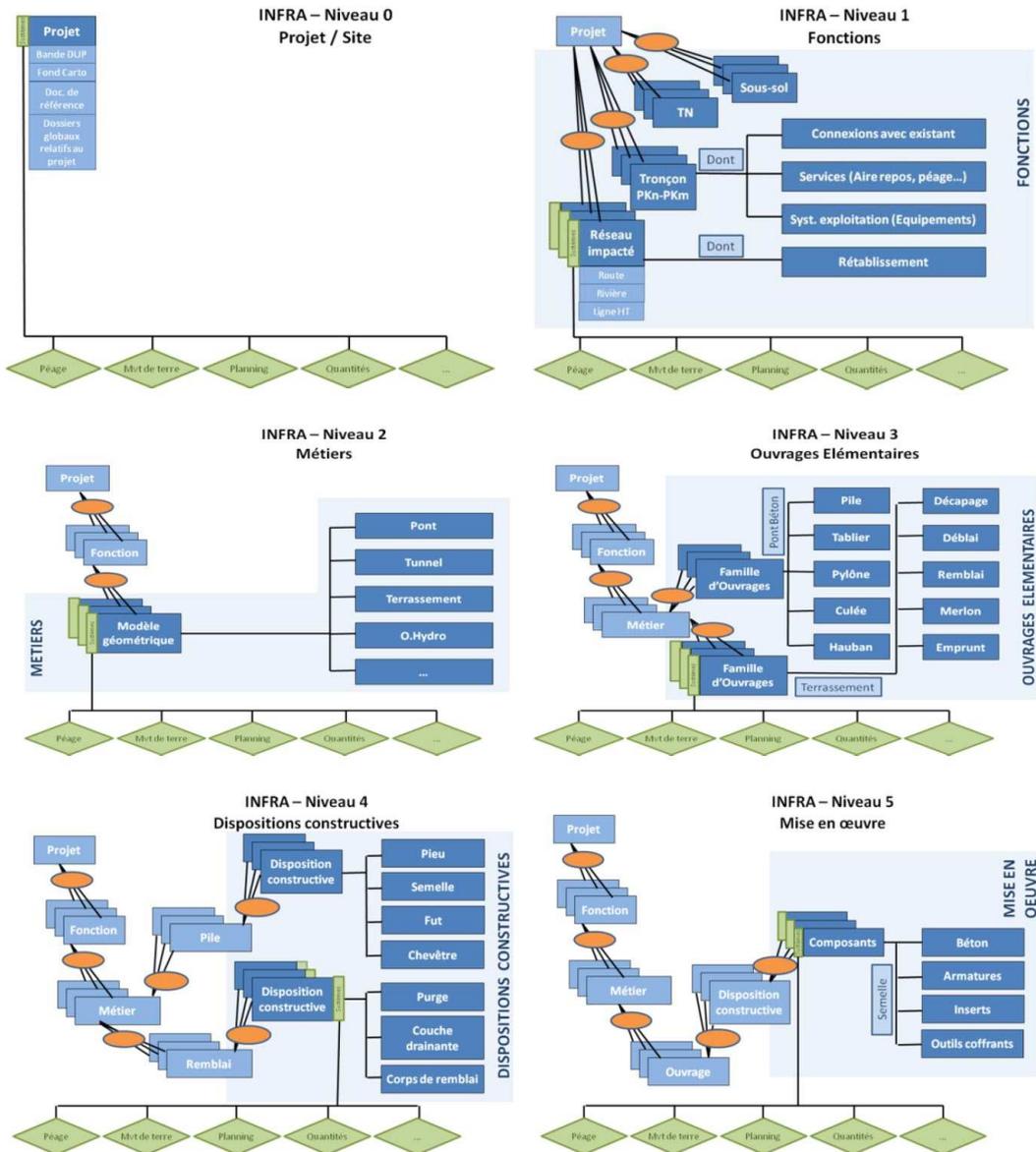


FIG. 5.17 – Exemple de décomposition d'un projet en objets avec les LODEf [Communic L3, 2010].

Certaines interrogations restent en suspens par rapport à cette proposition de LODEf du projet Communic [Communic L1, 2010]. Voici quelques points bloquants que nous retenons :

1. Comment se comporte cette structuration aux changements de phase ? Le N2 par exemple peut varier entre la conception, l'exécution des travaux et l'exploitation alors que les objets construits (vision organique) sont les mêmes.
2. Pas de prise en compte de la multi-représentation possible, excepté avec notre première proposition de supprimer cette hiérarchie.
3. Les LODEf ne mettent pas assez en évidence la progression de la conception : les mètres n'apparaissent pas.

raissent qu'au N5 alors qu'il y en a tout au long de la conception. Le concept de LODt serait à ajouter à ces LODef.

4. Les LODef et les niveaux de détail jouent tous deux le rôle de gestion de la présence d'un objet, ou de son absence dans une modélisation, respectivement selon qu'ils s'agisse des grands ouvrages et systèmes, ou de composants organiques.

5.4 Analyse comparative

5.4.1 Analyse comparative des concepts de LOD et de LODt

La première grande différence entre les LOD de CityGML et les LODt (ou LOD - LOI) se trouve dans l'approche de l'abstraction. Les LOD de CityGML sont orientés en fonction du principe de « généralisation », contrairement aux LODt qui, pour la modélisation des informations de conception, sont orientés « spécialisation » de l'information comme l'évoquent [Borrmann *et al.*, 2014]. Mais nous avons montré que ces deux approches sont nécessaires pour la gestion de l'information en corrélation avec la réponse aux exigences. Ainsi, l'utilisation des LOD et des LODt simultanément sur des modèles communs n'est pas possible dans leur définition actuelle alors qu'ils sont nécessairement présents dans un projet de conception d'infrastructure comme le montre la Figure 5.18 (flèches rouges). Par ailleurs, le LODt seul ne permet pas de continuité entre les différentes vues du projet puisqu'il ne concerne que les éléments « organiques » (équivalent du LoD 5 de la proposition de Borrmann *et al.* et des LOD3 et 4 de CityGML). Ainsi, les représentations peu détaillées ne sont pas conservées lorsque le LODt des modèles progresse : la modélisation la plus simple (ou la plus abstraite) n'est pas comprise dans les modélisations plus détaillées de chaque objet.

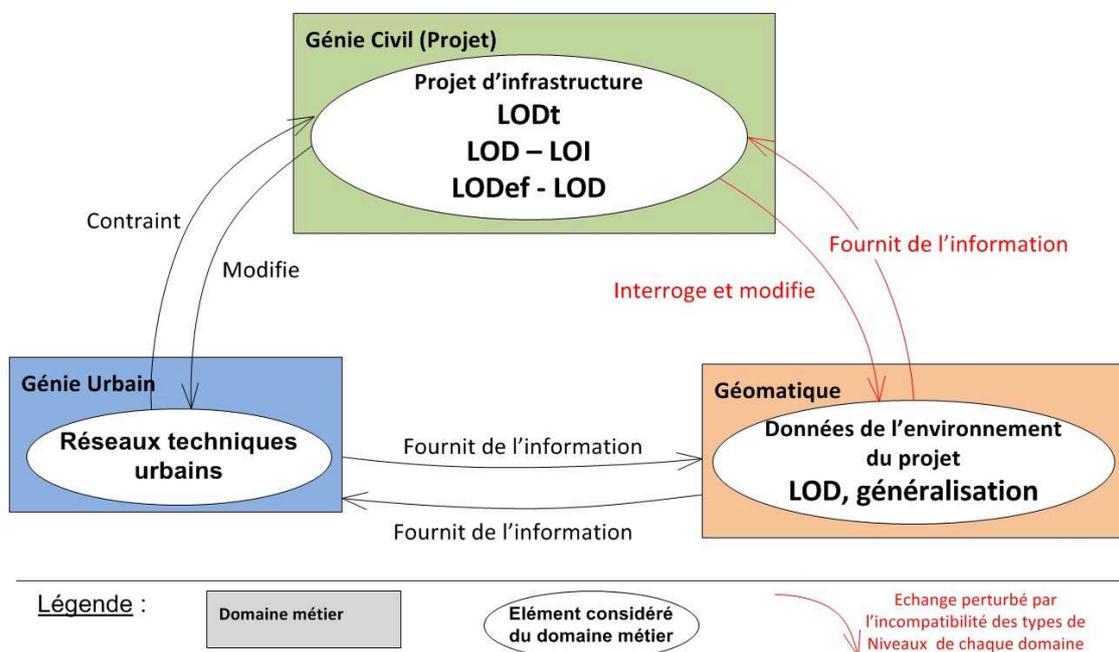


FIG. 5.18 – Triptique des domaines dans lequel s'inscrit notre recherche et mise en évidence des incohérences dans les échanges d'information (en rouge) entre ces domaines, du fait des différents concepts de niveaux. Figure adaptée de [Diab, 2000 ; Bonierbale, 2004].

La proposition de Borrmann *et al.* [2014] semble intéressante puisqu'elle est pensée pour la conception d'infrastructures. Toutefois, ne considérant que les tunnels, l'environnement à décrire est simplifié. Le point de vue modélisé par ces niveaux de détails (notés LoD) est finalement celui d'un seul obser-

vateur qui porte plusieurs regards sur l'ouvrage selon ses besoins : comme l'écrivent [Borrmann et al. \[2014\]](#), « Le modèle multi-échelle proposé contient simultanément tous les différents niveaux de détail, ce qui permet au planificateur de basculer dynamiquement entre eux et choisir le niveau d'abstraction approprié pour une tâche de planification particulière ». Dans cette proposition, on remarque qu'il n'y a pas de distinction entre ce qui est représenté, la manière dont il l'est, et les attributs et informations des objets modélisés. Cette proposition implique que tous ces objets n'aient qu'une seule représentation. Une telle approche ne comprend en fait qu'un univers du discours, avec une déclinaison toujours hiérarchique de l'information modélisée en cohérence avec la croissance des LoD proposés. Nous faisons un constat similaire pour les LoD et les LOD de CityGML. Cela représente un frein important à leur utilisation. Cette proposition serait applicable à d'autres types de projets d'infrastructures [[Borrmann et al., 2012](#)]. Il s'agit d'un sujet à approfondir suite aux remarques formulées ci-dessus. Ajoutons quelques remarques complémentaires sur cette proposition qui illustrent sa difficile applicabilité sur un projet d'infrastructure linéaire.

- Les seules relations paramétriques entre objets et la conservation des étapes de conception suffisent-elles à conserver une cohérence pour la navigation entre différents LoD pour un projet de route ? Dans un contexte d'infrastructure de type route, il conviendrait de vérifier cela sur les nombreux objets non liés à l'axe du tracé.
- Ces cinq niveaux conservent toujours des relations étroites entre certains des sous-concepts constitutifs du LoD. Ainsi, la complexité géométrique croît dans une mesure similaire à la sémantique. Par contre, la précision géométrique n'est pas évoquée mais elle est nécessairement identique entre tous les LoD d'une même étape de conception puisqu'il s'agit ici d'une réelle représentation multiple d'une même infrastructure.
- Chaque niveau impose une vision uniforme portée sur le projet. Alors que lors du dimensionnement de l'assainissement longitudinal des plateformes de chaussée par exemple, les fondations des ouvrages d'art ou portiques de signalisation verticale ne sont pas encore dimensionnés. Toutefois, il est pertinent de modéliser un gabarit approximatif dans l'optique d'évaluer les potentiels clashes dans les phases suivantes de la conception. Donc il peut être possible d'avoir à modéliser simultanément des objets physiques et seulement des espaces réservés à de futurs objets ou systèmes (gabarits).
- Les auteurs évoquent un problème qui n'est pas résolu par leur modèle actuel : la re-généralisation des informations pour que les modifications à un LoD élevé puisse être répercuté aux LoD plus faibles. Cette question est pertinente et nous intéresse particulièrement dans notre travail mais n'a pas de réponse simple pour le moment. Notre approche de structuration des informations par l'ingénierie des exigences doit au travers des applications du Chapitre 7 identifier au minimum certains besoins de généralisation de données lors du contrôle des réponses aux exigences.

Confrontons maintenant directement les LOD de CityGML et les LODt pour la conception d'infrastructures.

Les LOD de CityGML informent sur la qualité du relevé d'un objet existant (qualité d'implantation et de la géométrie). Les LOD reflètent donc la précision du modèle comme nous l'avons évoqué en nous appuyant sur [[Kolbe et al., 2005](#)]. Un modèle à un certain LOD implique donc implicitement une qualité de la donnée modélisée. Pour un projet de conception, le LODt joue ce rôle mais localement, pour chaque objet. En effet, la précision dans la définition de l'information n'est pas homogène dans un projet de conception. Cette question de la précision, du flou ou de l'incomplétude des données n'est que peu abordée dans notre travail mais nous notons tout de même une impossibilité à utiliser simultanément les LOD et LODt dans leur actuelle définition sur un même projet du fait de leur incompatibilité à ce sujet.

Un point de vue évoqué dans [[BIMForum, 2015](#)] propose de considérer le « niveau de détail » comme « l'entrant » de la conception et le LODt comme le « sortant ». Ce serait en quelque sorte

un objectif de conception. Le LOD serait ce que l'on échange et le LODt ce que l'on est capable de fournir (au mieux). Cette proposition est peu étayée dans le document et difficilement défendable. Le simple fait que les sortants de certains acteurs deviennent l'entrant d'autres acteurs imposerait une transformation du LODt en LOD. Or, nous venons de démontrer l'incompatibilité de ces deux concepts. Nous avons toutefois besoin de ces deux concepts (ainsi que de leurs sous-concepts). En effet, on peut lire dans [Ferriès et Bonhomme, 2014] que le LOD de CityGML est fondamental pour la bonne définition du détail nécessaire selon l'analyse, et que la précision obtenue pour ces analyses est fonction du LODt décrivant chaque objet. C'est en partie vrai mais n'oublions pas que le concept de LOD intègre également la notion de précision. Cette affirmation serait parfaitement correcte avec une redéfinition partielle de ces niveaux pour une utilisation décorrélée des sous-concepts constitutifs des LOD et des LODt. Notre proposition de redéfinition de ces niveaux ira dans ce sens.

Enfin, en complément du besoin de conserver ces sous-concepts, les relations de spécialisation et de généralisation entre les niveaux doivent également apparaître dans notre proposition, mais toujours de manière non corrélée. En effet, ces problématiques de spécialisation mais surtout de généralisation sont un moyen de vérifier les exigences. Une exigence se décompose souvent en d'autres exigences. Nous cherchons, comme il est expliqué à la fin de la deuxième partie de ce mémoire, à établir une correspondance au moins partielle entre la structuration des exigences et celle des Objets_I du modèle. Donc la vérification des exigences de plus haut niveau (avant leur décomposition) devrait s'effectuer en s'appuyant sur des objets et informations issus de la généralisation de données.

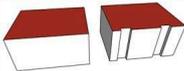
5.4.2 Sous-concepts communs entre niveaux

Le cas des sous-concepts communs est évoqué comme une problématique fondamentale en défaveur de l'utilisation simultanée des LOD de CityGML et des LODt. Leur corrélation dans chaque type de niveau constitue déjà une fragilité conceptuelle de la définition individuelle des LOD ou des LODt. Le Tableau 5.7 ci-dessous reprend l'ensemble des analyses des différents niveaux étudiés dans ce chapitre et de leurs sous-concepts : LOD [Norme de CityGML, 2012], LODt [BIMForum, 2015], couple LOD - LOI [PAS 1192-2, 2013] et couple LODef - niveau de détail [Communic L1, 2010]. Cette synthèse met en évidence plusieurs points. Les conclusions à tirer de cette analyse sont les suivantes :

1. Aucun de ces concepts de niveau ne gèrent de la même manière les six sous-concepts principaux étudiés ici : les corrélations entre la croissance du niveau considéré et les impacts sur leurs sous-concepts constitutifs sont différentes. Il n'est donc pas possible de reprendre uniquement certains éléments des différents niveaux et de les assembler : il devient nécessaire de redéfinir les différents *niveaux* à utiliser dans notre MCD.
2. Les sous-concepts constitutifs des différents types de niveaux sont tous à conserver.
3. Ces concepts en niveaux gèrent de manière implicite trop de sous-concepts et les LODt seuls ne gèrent pas la présence des objets dans le modèle.
4. Certains sous-concepts sont notés comme explicitement gérés par les concepts en niveaux du Tableau 5.7 :
 - tous les paramètres et concepts d'un MCD ne peuvent être gérés par une structuration hiérarchique, en niveaux ;
 - l'application pratique de ces sous-concepts reste à expliciter : nous avons par exemple mis en évidence que pour les attributs, il n'existe pas de règles très précises pour leur affectation aux différents LOD ; également pour les LOD - LOI du BIM Toolkit, la définition des informations relatives à chaque niveau pour chaque objet existe mais est proposé dans un contexte général du projet et non en lien avec les exigences à résoudre, pour lesquelles un modèle est constitué.
5. Ces six sous-concepts nécessitent des étapes préliminaires pour structurer la modélisation d'une infrastructure afin qu'ils soient gérés de manière indépendante. Citons principalement l'identification des exigences puis la sélection des ontologies de domaine. Ces étapes constituent également

le premier travail d'abstraction et de simplification de la réalité à modéliser pour la définition du contenu de chaque BIM uses. L'utilisation des sous-concepts des LOD, LOI ou LODt permet ensuite d'affiner ce premier travail et d'adapter l'information sémantique et géométrique.

TAB. 5.7 – Synthèse de décomposition des sous-concepts des LOD de CityGML [Norme de CityGML, 2012], des LODt de BIM Forum [BIMForum, 2015], du couple LOD - LOI du [PAS 1192-2, 2013; Bsi, 2015] et des LODef et niveaux de détail de Communic [Communic L1, 2010], avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	présence	attributs
illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	OUI ou NON	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
LOD (CityGML)	+	0	-	-	+	+
Level Of Development (BIM Forum)	+	0	-	+	0	+
Level of model Detail (NBS)	+	-	-	0	0	0
Level of model Information (NBS)	0	0	0	+	0	+
LODef (Communic)	0	0	0	+	+	?
Niveaux de détail (Communic)	+	-	-	0	+	?

Légende :

- + : le sous-concept est explicitement gouverné par le type de niveau
- : le sous-concept est implicitement gouverné par le type de niveau
- 0 : le sous-concept n'est pas géré par le type de niveau

Notons que dans leur étude, [Biljecki et al., 2014b] évoquent dans d'autres travaux des termes qu'ils jugent plus appropriés que le seul LOD : le niveau de qualité, le niveau d'abstraction déjà évoqué précédemment ou le niveau de complétude. Notre proposition va partiellement dans ce sens, bien que l'utilisation permanente de niveau et donc d'arborescence ne soit pas toujours pertinente. Certains éléments comme la précision font partie de l'information d'un objet, de sa partie attributaire et ne nécessitent pas forcément un concept pour sa gestion dans la modélisation.

5.5 Conclusion sur l'analyse des niveaux pour la structuration de l'information

Biljecki et al. [2014b] proposent des relations moins linéaires entre la croissance des LOD et celle de la précision des informations relatives aux six sous-concepts constitutifs des LOD de CityGML. Cette proposition est une réponse partielle à nos besoins. La structure des LOD reste inchangée. Nous cherchons un moyen de gérer ces sous-concepts de manière décorrélée selon les vues métier, les niveaux d'abstractions et les exigences à traiter. Du fait de la corrélation entre les sous-concepts de chaque niveau, la modélisation visuelle (composée de la *complexité géométrique*, de la *dimensionnalité*, de la *présence* et de l'*apparence*) traduit le développement du reste de l'information d'un objet. Concrètement, un rendu réaliste indique, dans l'ensemble des données qui décrivent un objet, une meilleure précision que si ce dernier était représenté avec un rendu peu réaliste ou peu travaillé. C'est un réflexe cognitif non négligeable mais l'apparence sert également d'aide à la compréhension pour augmenter l'efficacité d'un observateur dans son analyse d'une scène 3D comme nous l'expliquons dans l'Annexe F section F.1. Donc, la corrélation entre information visuelle et information attributaire ou sémantique ne doit pas être linéaire.

Dans un contexte de modélisation 3D, l'échelle ne constitue plus le critère d'entrée de la modélisation. Le besoin de rendre visuellement exploitable une modélisation reste présent mais est à gérer différemment. (Pour rappel, l'Annexe F apporte des éléments sur ce sujet.) Nous avons vu que le niveau d'abstraction devient le premier critère de la structuration et de la modélisation. Il correspond à la conceptualisation évoquée par Gruber [1993] nécessaire à la création ou à la sélection d'ontologies. Il est implicitement inclus dans les LODef de Communic. Nous les analysons comme ayant une

abstraction par niveau. Toutefois, la partie métier de la décomposition apparaît pour tous les acteurs aux niveaux 1 et 2. Le détail à apporter ensuite aux objets de chaque LODef correspond aux LOD de CityGML. Pour ces LOD justement, nous avons vu qu'ils permettent en fait de faire varier le détail dans la modélisation d'une seule vision portée sur le milieu urbain. Constat que nous portons également au concepts de LODt (LOD - LOI). Cela revient à modifier le contenu des ontologies utilisées mais non pas à sélectionner les ontologies pertinentes selon la modélisation. (Il est effectivement possible de ne pas considérer certaines classes d'objets dans une modélisation (végétation, route, bâtiment, ouvrages, etc.), ce qui revient à sélectionner les ontologies de domaine pertinentes mais il s'agit selon nous d'une procédure artificielle contrairement aux trois étapes de la modélisation.) Ainsi, l'abstraction n'est pas considérée tout à fait de la même manière pour tous ces types de niveaux et reste assez implicite dans ces concepts. Dans les trois étapes de la modélisation évoquées plus haut, nous avons rappelé le besoin de définir en premier lieu les univers du discours d'une modélisation, ce que nous ne retrouvons pas dans ces concepts puisque l'abstraction est uniquement liée à la notion de détail de l'information, géométrique, sémantique ou attributaire et non à la vue portée sur le projet.

Dans le chapitre suivant, nous présentons notre modèle conceptuel de données qui apporte des solutions aux problématiques évoqués dans ce chapitre. Nous explicitons comment répartir les différents sous-concepts dans la structuration de l'information pour répondre au mieux à notre besoin de processus de définition du contenu des BIM uses.

Modèle conceptuel d'objet structuré par les LOXi

Do we understand the world because of its tree structure, or does it appear to us like a tree because those aspects which are not beyond our comprehension.

Herbert Simon, *The sciences of the artificial*, 1982.

Cette citation est évocatrice de la difficulté à décomposer une infrastructure en objets. De manière naturelle, la décomposition d'un objet s'effectue par vues successives, avec en général une augmentation du nombre d'objets à chaque nouvelle décomposition. Le résultat final de l'ensemble des objets et de leurs relations se présente sous la forme d'un arbre. Or, dans notre première partie, lors de la présentation du travail retour d'expérience du projet L2 Marseille, nous avons évoqué certaines problématiques concernant la décomposition d'un projet dans un arbre unique. Cette structuration s'est avérée délicate à manipuler et à conserver au cours des étapes de conception, de partage et de coordination (mélange de zones, d'ouvrages fonctionnels, de systèmes, d'éléments abstraits, d'objets concrets, etc. ; voir pour rappel la Figure 2.1 page 45). Nous avons démontré qu'une décomposition arborescente unique ne suffit pas pour permettre d'utiliser le concept de BIM use et de décrire des extractions partielles du modèle de l'infrastructure pour répondre à des exigences spécifiques. Nous avons alors évoqué la nécessité de décomposer simultanément le projet de plusieurs manières. L'ingénierie des systèmes propose un cadre pour développer cette possibilité.

Dans ce chapitre, nous dévoilons une partie importante de notre recherche. Nous décrivons l'utilisation d'outils conceptuels que nous avons adaptés pour répondre aux besoins insatisfaits et aux incohérences des outils conceptuels existants : il s'agit de notre proposition d'un ensemble de trois types de niveaux, noté LOXi. Ces niveaux sont basés sur les niveaux existants que nous venons d'étudier dans le chapitre précédent. Cette redéfinition apporte une structuration moins hiérarchique des Objet_I et surtout, une indépendance entre la structuration de ces derniers, les échelles, le détail et l'abstraction portée sur le projet. Nous détaillons également la méthode d'application de la modélisation en trois axes en y intégrant nos LOXi : cette proposition exploite les sous-concepts présents dans les niveaux étudiés pour faciliter la sélection des informations pertinentes pour chaque BIM use. Ce chapitre décrit d'autres apports de notre travail. Nous présentons dans une proposition de décomposition d'un projet d'infrastructure avec deux points de vue, en adéquation avec la structuration des exigences traitée dans la deuxième partie de ce mémoire de thèse. Également, nous détaillons un modèle conceptuel adapté pour chaque Objet_I. Ce dernier établit les liens entre les Objet_I, les décompositions du projet et les exigences. Nous ne considérons que les Objets_I pour notre proposition de MCD. Il s'agit donc uniquement des objets du *système à faire* avec une existence spatiale et non pas de tous les objets

du système à faire. L'ensemble de ces concepts et méthodes, complété par l'approche de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences, doit permettre de définir les ontologies à utiliser sur projet et donc l'information nécessaire pour la résolution de chaque exigence au travers des BIM uses.

Cette partie de proposition sera, comme celle de la partie précédente, évaluée par expérimentation sur des cas pratiques dans la quatrième partie de ce mémoire.

6.1 Exploitation des niveaux de Communic

Dans notre réflexion, les propositions issues du projet [Communic L1, 2010] prennent une place importante puisque ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de ce projet de recherche et du projet MINnD, successeur de Communic. En parallèle de notre analyse des différents niveaux, nous avons mené des expérimentations sur projet. Ces expérimentations ont également alimenté notre proposition. Nous rapportons ici une première application des LODef modifiée en introduisant plus clairement les notions d'Espace et de Système [Castaing et Tolmer, 2015]. Rappelons tout d'abord la définition de ces classes d'objets et leur utilité dans le MCD.

6.1.1 Décomposition en espace

Le concept d'espace n'est pas récent : il existait déjà dans les premières réflexions sur la structuration de l'information de projet comme évoqué dans [Groupe Structuration de Données, 1991]. Cette notion a depuis évolué, d'autant plus qu'elle concernait uniquement les projets de bâtiment. L'espace dans un projet d'infrastructure se révèle plus délicat à saisir. Contrairement aux projets de bâtiment, une infrastructure se construit dans un espace ouvert aux limites floues, toujours en interaction avec l'existant : il n'y a pas d'enveloppe délimitant un intérieur ou un extérieur. Certains espaces servent plutôt à l'identification d'un lieu et n'ont donc pas de limite précise. Ensuite, la définition des espaces dans un projet de bâtiment fait rapidement l'unanimité. Les espaces identifiés sont communs à tous les acteurs (bâtiment, étages, pièces, etc.) et répondent à une ou plusieurs fonctions. Ce n'est absolument pas le cas pour les projets d'infrastructure comme nous le verrons sur les exemples traités en quatrième partie. La décomposition spatiale d'un projet d'infrastructure varie selon plusieurs facteurs : le point de vue métier ou l'acteur, le niveau d'abstraction pour décrire le projet, l'exigence traitée, la phase. Par conséquent, il ne s'agit pas uniquement des espaces au sens strict des modèles de données classiques. Ces espaces ne sont pas nécessairement limités par un objet « limite » constitué d'autres objets comme des séparateurs ou des murs (c'est le cas des espaces de CityGML par exemple ou des IFC). Il peut s'agir de repères spatiaux (une sortie d'autoroute, un échangeur autoroutier) ou des zones soumises à certaines réglementations par exemple. Cette notion étendue de la classe « Espace » permet de gérer :

- l'appartenance d'objets à des zones spécifiques (zone de faune ou flore sensible, à protéger) ;
- la détection des clashes et la catégorisation de leur importance, en complément de la sémantique ;
- les exigences qui se rapportent directement à des zones particulières ou à des espaces métier (accès publics ou non, gestion du foncier, zone complexe avec de nombreux réseaux et ouvrages nécessitant une attention particulière pour les phases de construction, etc.).

6.1.2 Décomposition en systèmes

Nous travaillons ici principalement sur les Objet_I qui ont vocation à être échangés par l'intermédiaire de standards d'échanges. Un « Système » est décrit dans les IFC comme « une combinaison organisée de pièces ou de produits de l'industrie de la construction, assemblés pour un but commun ou pour créer une fonction ou fournir un service. Un système est essentiellement une agrégation fonctionnelle de produits » [BuildingSMART, 2013]. Mais comme pour les espaces ci-dessus, traiter des projets d'infrastructures impose d'étendre cette définition. Rappelons celle donnée dans le cadre de l'ingénierie système à la section 4.1 page 81 : « un système est constitué d'un ensemble d'éléments dont la synergie

est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné » [Fiorèse et Meinadier, 2012]. Un Système regroupe donc les éléments qui fonctionnent ensemble pour fournir un service, répondre à une fonction. Du point de vue de l'exploitant et de la gestion des systèmes urbains, cette notion de système permet d'après Bonierbale [2004] de s'intéresser à leur gestion, de considérer les interactions entre les éléments de ces systèmes et de comparer des systèmes de tailles différentes. Bonierbale ajoute que la définition des frontières des systèmes sert à l'étude des interactions et interfaces entre systèmes, à la fois pour les systèmes en conception et en exploitation. En effet, la conception modélise le système tel qu'il sera exploité, en considérant notamment son environnement. En complément, du point de vue de la conception, l'utilité de la structuration des objets par les systèmes peut se justifier par plusieurs exemples. Rappelons celui donné en Figure 5.14 page 132 : une répartition des Objet_I dans des systèmes facilite la lisibilité de l'importance des différents clashes. La classe Système permet également d'identifier les impacts de la modification d'objets d'un Système sur le fonctionnement d'un autre système auquel il appartient également. Des illustrations sont données plus bas. Nous verrons dans notre quatrième partie sur nos cas d'usage que cette notion de Système est souvent relative à un métier spécifique et permet ainsi de sélectionner les objets d'une ontologie de domaine.

Apportons maintenant quelques précisions sur cette proposition en lien avec la Figure 6.1 et expérimentée sur le projet de Rcade L2 à Marseille. Les LODef 0 à 2 restent inchangés. Par contre, c'est à la place du LODef 3, niveau des *ouvrages élémentaires*, que nous introduisons ces deux notions d'*Espace* et de *Système*. Elles sont donc attachées sous le niveau de décomposition des métiers (LODef 2). Les décompositions sont partiellement génériques (certains Espaces ou Systèmes sont communs au projet, d'autres sont spécifiques à un métier). C'est ensuite aux LODef 3, 4 et 5 (voir définition en section 5.3 page 136) qu'apparaissent les différents composants et ouvrages élémentaires. Il s'agit d'objets comprenant une géométrie 3D de modélisation. Cette structuration permet tout d'abord d'introduire dans le Modèle Conceptuel de Données des arborescences spécifiques à chaque métier, décrites dans des ontologies de domaine (voir la superposition des rectangles gris en partie basse de la Figure 6.1). Cette décomposition montre que l'utilisation de sémantique structurée (utilisation d'ontologies métier) engendre des décompositions multiples des ouvrages fonctionnels d'un projet d'infrastructure : plusieurs arbres coexistent. La différenciation des LODef 3, 4 et 5 est masquée ici par le lien de composition de la classe Objet_I. Ainsi, les Espaces et Systèmes puis les Objet_I sont spécifiques à chaque métier. Ensuite, un Système étant un ensemble d'Objet_I, il doit également s'inscrire dans un Espace.

Suite à l'application de cette première proposition de structuration des Objets_I (voir Figure G.1 et G.2 en Annexe G pages 265 et 266), nous en avons tiré les conclusions ci-dessous.

- Chaque acteur utilise une décomposition spécifique. Ces décompositions ne sont que partiellement similaires, d'où la nécessité de faire apparaître plusieurs arbres de décomposition. Les similitudes se situent dans les premiers niveaux et les différences les plus importantes au niveau des Objet_I.
- L'appartenance des objets aux différents Espaces et Systèmes est multiple et diffère selon la vue métier de l'acteur. Par exemple, les murs acoustiques appartiennent au système « dispositif de protection acoustique » selon le point de vue du bureau d'étude acoustique mais ils appartiennent également aux espaces relatifs à leur implantation spatiale pour les autres utilisateurs concernés par ces objets (BE structure, paysagiste, direction des études pour la coordination etc. : arborescence non présentée dans ces Figure G.1 et G.2 en Annexe G). Or, ce sont principalement les Espaces et Systèmes qui permettent d'identifier les objets pertinents pour des analyses spécifiques. Un même Objet_I peut donc appartenir à plusieurs décompositions, donc à plusieurs ontologies de domaine. Cela signifie que les arbres de décomposition sont potentiellement connectés au niveau des Objets_I.
- Nous n'étudions dans ces diagrammes que les classes d'objets mais pas les informations liées de type géométrique, sémantique ou attributaire. Ces éléments diffèrent également selon de nombreux paramètres de contexte du modèle étudié comme la phase ou les outils de modélisation. Les

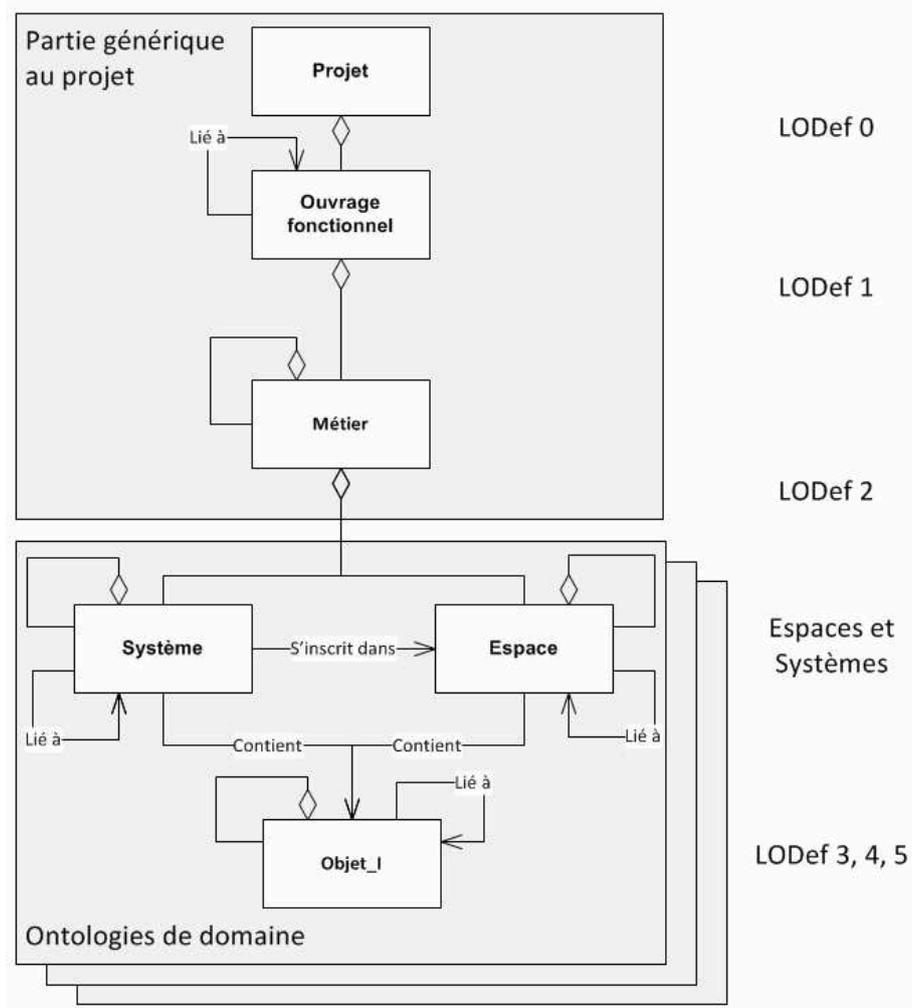


FIG. 6.1 – Proposition de modification de la structuration des niveaux de définition LODef du projet *Communic*. Figure basée sur [Castaing et Tolmer, 2015].

niveaux de détail proposés en complément des LODef ne sont pas suffisants comme nous l'avons vu avec l'exemple résumé dans le Tableau 5.6 page 135. Cette arborescence des LODef nécessite des concepts complémentaires de gestion de l'information.

Cette hiérarchisation n'autorise finalement qu'une seule vision du projet malgré le détail apporté par les ontologies de domaine. Même avec la prise en compte des Espaces et Systèmes, cette proposition aboutit à un modèle de structuration des *Objet_I* qui reste hiérarchique. La gestion des multi-décompositions des Espaces et Systèmes est uniquement dirigée par la vue métier, or ce n'est pas le seul critère qui influe sur la structuration de ces classes. Nous avons vu que la structuration des objets du MCD doit être cohérente avec la structuration des exigences. Or, il n'est pas possible d'établir de la cohérence entre cette proposition et les trois vues de structuration des exigences. Nous arrivons donc à la conclusion suivante : sur la base d'une réflexion top-down, l'architecture de l'ensemble des *Objet_I* nécessaires à la modélisation d'un projet d'infrastructure, au travers d'un arbre unique (une seule abstraction) n'est pas pertinente. Cette conclusion est étayée par celles déjà obtenues lors des expérimentation préliminaires sur les projets de la Nouvelle Route du Littoral (Ile de la Réunion), de la Rocade L2 Marseille, ou des expressway au Qatar.

Conformément à l'approche de l'ingénierie des exigences, la définition des besoins permet de décrire le domaine du problème, pour lequel il faut ensuite définir les exigences correspondantes et les éléments du domaine de la solution qui y répondent. La définition des ouvrages fonctionnels constitue la première étape de réponse à ces besoins. Ils portent les fonctions principales de l'infrastructure, d'où l'importance de les conserver dans le MCD. La classe *entité (ou ouvrage) fonctionnelle* conserve donc son importance dans la décomposition du projet : ce sont des éléments spécifiques et chargés de sens pour les projets d'infrastructures. Par contre, la classe Espace est remise en question. Elle déspatialise les entités fonctionnelles alors que ces dernières constituent l'élément principal de la structuration à la fois fonctionnelle et spatiale d'un projet d'infrastructure. Il s'agit d'un concept qui creuse encore la différence entre les projets d'infrastructures et ceux de bâtiments ou même d'autres industries. Ces entités fonctionnelles sont à la fois :

- des repères spatiaux du projet,
- une réponse à un ou plusieurs besoins,
- un ensemble cohérent contenant des Systèmes et étant traversé par des systèmes,
- un élément d'interface avec l'existant,
- une matérialisation des limites floues entre les systèmes existants perturbés par le projet et le projet.

Il s'agit également des ouvrages principaux d'un contrat : ces entités correspondent souvent aux différents lots ou aux limites de prestation. Ainsi, nous ne conservons dans notre proposition de MCD que les concepts d'Entité fonctionnelle et de Système mais pas celui d'Espace : il est inclus dans celui d'Entité fonctionnelle ce qui redonne du sens à cette entité si particulière des projets d'infrastructures. Pour conclure ce choix, évoquons la citation ci-dessous de Boris [Beaude](#) : l'espace ne peut être résumé à un volume contenant d'autres éléments plus importants en sens et en utilité.

« L'espace est généralement conçu comme une réalité matérielle et il est souvent assimilé au territoire, sur lequel seraient situées d'autres réalités (individus, habitations, véhicules, ressources, etc.) La faiblesse de cette conception de l'espace, pourtant largement répandue, peut néanmoins être résumée en une question relativement simple : si l'espace est une chose, où est l'espace ? Cette question souligne l'aporie d'une conception de l'espace comme support matériel de l'action. »

Les fins d'Internet, Boris Beaude, [2014]

6.2 Définition des LOXi retenus pour le MCD

Notre proposition de redéfinition de ces concepts consiste principalement à supprimer les corrélations entre sous-concepts et répondre aux besoins en modélisation, subséquents à notre approche par l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences, ainsi que par la modélisation en trois axes. Nous avons également identifié les conséquences néfastes de l'exploitation de sous-concepts relatifs à la modélisation dans un seul concept de niveau (LOD, LOI-LOD ou LODt). Ensuite, la structuration et la décomposition, seules, ne suffisent pas à architecturer les Objets_I d'un modèle d'infrastructure. La question du point de vue et de l'abstraction portée sur le projet doit être première et non simultanée à la décomposition. Pour alimenter notre recherche, nous souhaitons citer une réflexion importante de [Dupuy](#) : il écrit qu'un découpage en niveaux, selon les éléments considérés, peut influencer les décisions [[Dupuy, 1991](#)]. Cela renforce l'idée qu'un découpage unique n'est pas pertinent : nous justifions ainsi le fait d'adapter les décompositions selon les besoins pour influencer le moins possible les réflexions avec une structuration de l'information générique mais inadaptée. Ainsi nous retrouvons une justification manifeste de l'importance de définir correctement les univers du discours, première étape de la modélisation. La définition des modélisations de l'information dans les BIM uses grâce à des expérimentations comme celles que nous présentons dans notre quatrième partie vise à déterminer la modélisation de

l'infrastructure et les éléments pertinents à modéliser selon le besoin ou les exigences à traiter.

Nous avons également mis en lumière le fait que la structuration des informations par les LOD, LOD - LOI ou LODt est régie par des inclusions de concepts (concepts et sous-concepts). L'utilisation de ces niveaux tels qu'ils sont actuellement définis est donc impossible pour les raisons explicitées ci-dessus dont nous en rappelons ici les principales :

- recouvrement de sous-concepts ;
- corrélation entre sous-concepts ;
- approche trop globale portant sur l'ensemble du modèle ;
- définitions trop ambiguës sujettes à interprétations et donc à des utilisations incohérentes entre modèles ;
- structuration unique de l'information.

Nous proposons donc notre définition de trois concepts regroupés sous l'acronyme LOXi pour Level Of X avec X variable : il peut prendre les valeurs de D (Detail), I (Information) ou A (Abstraction). Le *i* signifie qu'il est possible de numéroter ces niveaux comme c'est le cas aujourd'hui mais nous ne considérons pas les numérotations actuelles pour signifier que cette distinction des niveaux d'un même type ne serait pas hiérarchique mais seulement un moyen d'identifier un LOX parmi d'autres. Ces LOXi permettent de structurer l'information composant le *système à faire* du projet de conception et de la représenter. Notre proposition redistribue les 6 sous-concepts dans les trois nouveaux niveaux détaillés ci-dessous.

6.2.1 Niveau d'abstraction (Level Of Abstraction, LOA)

Le concept de *niveau d'abstraction* figure à plusieurs reprises dans ce mémoire. Au regard de la précédente analyse sur les LODef, LOD et LODt, il convient d'apporter certaines précisions. Nous noterons maintenant LOA pour Level Of Abstraction, ceci afin de conserver une cohérence avec la notation des autres niveaux, bien que cela n'implique aucunement une équivalence en termes d'importance entre ces concepts. Nous allons voir la place centrale que prend ce concept dans la structuration de l'information en lien avec ses utilisations.

Dans le sens commun, il n'y a pas de réelle hiérarchie entre plusieurs *niveaux d'abstraction*. Les LOA correspondent à des vues différentes portées sur le projet pour résoudre un problème. Donc au sein d'un même BIM use, plusieurs LOA peuvent être utilisés par un même acteur : cela apporte des visions complémentaires. Un LOA peut également être utilisé par plusieurs acteurs : il est courant que plusieurs acteurs aient une même vision du projet (voir Figure 6.2). Par rapport au problème à résoudre, les LOA traitent des questions du type « Quels sont les objets du modèle ? Lesquels doivent être représentés ? ». Ils regroupent des éléments d'un ou plusieurs univers du discours (voir pour rappel la section 3.2 page 66) pour modéliser une réalité. Ils permettent ainsi de porter sur le modèle de l'infrastructure des regards fonctionnels ou organiques, d'où leur lien avec la sémantique du modèle (voir le Tableau 6.1). Pour répondre à chaque exigence, un ou plusieurs métiers sont concernés. Les LOA correspondent à l'utilisation de certaines ontologies de domaines, spécifiques à ces métiers.

Pour résoudre une exigence :

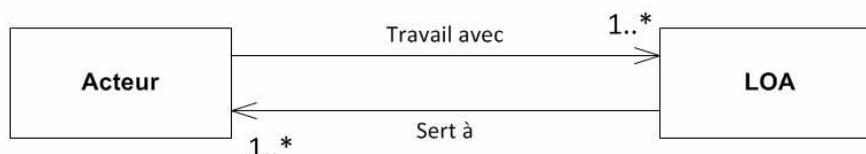


FIG. 6.2 – Illustration de la relation entre un Acteur du projet et les LOA pour répondre à une exigence.

Ensuite, le concept de niveau d'abstraction apparaît plusieurs fois dans la description des niveaux de détail ou des niveaux de développement. C'est un concept bien présent en géomatique et en conception mais pas toujours explicite. Nous avons démontré qu'il existait de manière implicite dans les concepts de LOD et de LODt. Mais si le niveau d'abstraction s'exprime ainsi dans ces concepts, cela signifie qu'il n'est pas le moteur principal de la modélisation et de la structuration de l'information contrairement à ce que nous avons décrit dans les trois étapes de la modélisation à la section 3.2 page 66. Notre proposition de LOA constitue pour nous une étape préliminaire de sélection de l'information pertinente à modéliser (les objets, systèmes, concepts et attributs). Il importe donc d'y avoir recours avant de s'intéresser à la réelle modélisation visuelle et sémantique de ces éléments ainsi sélectionnés, grâce aux LOD et LODt redéfinis que nous proposons ci-dessous.

6.2.2 « Niveau de détail » (Level Of Detail, LOD) et Niveau d'information (Level Of Information, LOI)

Comme le montre le Tableau 6.1, nous proposons d'utiliser pour nos LOD et LOI la définition du [PAS 1192-2, 2013] avec les remarques ci-dessous.

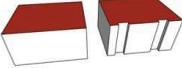
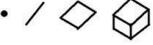
- Les LOD proposés sont identiques à ceux du [PAS 1192-2, 2013]. Les trois premiers sous-concepts sont liés dans ce concept de LOD pour conserver une cohérence dans la visualisation. Toutefois, la définition des univers du discours limite les possibilités de ces trois sous-concepts, ce qui n'est pas le cas dans la définition du PAS 1192. L'utilisation de cette proposition de LOD se fait également en lien avec les préconisations faites dans l'Annexe F.1) concernant la représentation de l'information.
- Les LOI proposés sont similaires à ceux du [PAS 1192-2, 2013]. La différence se situe dans la partie sémantique de ces sous-concepts. La sémantique vient des connaissances métiers et donc de la définition des univers du discours et de leur simplification par l'abstraction par les LOA (passage de l'axe 1 à 2 des trois axes de la modélisation). Elle n'est donc pas liée à notre concept de LOI mais à la sélection des ontologies de domaine. Par contre, d'autres critères secondaires et implicites aux LOD de CityGML sont définis comme faisant maintenant partie de notre proposition de LOI : nous pouvons évoquer la précision d'implantation, qui n'est plus un critère d'appartenance à un LOD (de CityGML) mais seulement un attribut. Évoquons également les notions de flou, d'imprécision ou d'incomplétude des données descriptives de l'objet qui peuvent faire varier la représentation visuelle d'un objet. Ces informations n'ont pas à influencer sur la structuration de l'information, comme c'est le cas dans les LOD de CityGML, mais sont importantes pour la compréhension et l'exploitation de la modélisation.

6.3 Notre proposition de LOXi dans les trois axes de la modélisation

En suivant les trois étapes de la modélisation décrites en section 3.2 page 66, nous identifions comment se situent le CityGML et les LOD ainsi que les IFC avec les LODt et les IDM par rapport à cette modélisation en trois axes. Nous verrons ensuite comment s'intègre notre proposition de LOXi par rapport à cet existant. Les objectifs de cette comparaison sont :

1. de contrôler qu'il s'agit bien d'une redéfinition partielle des niveaux existant avec un apport conséquent et pas d'une simple réorganisation des sous-concepts ;
2. de montrer que notre proposition est plus pertinente que les niveaux existants pour faciliter la modélisation du *système à faire*.

TAB. 6.1 – Répartition des sous-concepts dans les LOXi de notre proposition pour un MCD adapté aux projets d'infrastructures avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	présence	attributs
illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	OUI ou NON	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
LOD (CityGML)	+	0	-	-	+	+
Level Of Development (BIM Forum)	+	0	-	+	0	+
Level of model Detail (NBS)	+	-	-	0	0	0
Level of model Information (NBS)	0	0	0	+	0	+
LODef (Communic)	0	0	0	+	+	?
Niveaux de détail (Communic)	+	-	-	0	+	?
LOD proposé	+	+	+	0	0	0
LOI proposé	0	0	0	0	0	+
LOA proposé	0	0	0	+	+	0

Légende :

+ : le sous-concept est explicitement gouverné par le type de niveau

- : le sous-concept est implicitement gouverné par le type de niveau

0 : le sous-concept n'est pas géré par le type de niveau

6.3.1 Le cas de CityGML et des LOD

En reprenant les trois axes de la modélisation, voici les commentaires que nous pouvons faire concernant le CityGML et ses LOD :

1. Le CityGML décrit les univers du discours par sa considération des éléments de l'espace géographique et du milieu urbain (existant). Donc en utilisant ce standard, les univers du discours sont déjà déterminés. Seuls des ADE peuvent étendre cet ensemble d'univers du discours. Nous pouvons considérer qu'il n'y a qu'un univers du discours.
2. CityGML propose grâce au concept de LOD cinq simplifications de cet univers du discours. Dans un modèle CityGML un objet ne peut avoir qu'une représentation par LOD : un LOD ne correspond donc pas à un niveau d'abstraction. Le modèle conceptuel de CityGML relate les axes 1 et 2 de la modélisation en trois axes. Le LOD permet uniquement de faire varier la présence et la modélisation de chaque objet. Un objet qui n'est pas modélisé à un LOD de CityGML existe pourtant dans les univers du discours puisqu'il possède tout de même une modélisation dans un ou plusieurs autres LOD. Faire varier le LOD ne correspond donc pas à une variation de l'abstraction portée sur la réalité à modéliser.
3. La Norme de CityGML [2012] est décrite dans un formalisme de représentation UML et le standard de description des objets est le GML.

6.3.2 Le cas des IFC, des LODt et des BIM uses

En reprenant les trois axes de la modélisation, voici les commentaires que nous pouvons faire pour les IFC, les LODt et les BIM uses :

1. Le standard des IFC est défini à partir de la considération de l'univers du discours qui concerne le milieu de la conception de bâtiments. Certains compléments, comme les *IFC Bridge* ou *IFC Alignment*, apporte d'autres univers du discours relatifs aux infrastructures.
2. Le modèle conceptuel des IFC correspond à l'abstraction et à la simplification des éléments considérés dans les univers du discours. Les LODt quant à eux s'appliquent directement à des objets déjà identifiés. Ainsi, au fur et à mesure que la conception avance, les univers du discours s'enrichissent et donc les LODt peuvent décrire de manière plus détaillée les objets, ce qui correspond à leur croissance. Les sous-concepts des LODt gèrent donc l'information une fois la simplification

des univers du discours opérée. Nous conservons ce point dans notre proposition mais en répartissant l'information sémantique et géométrique dans deux concepts, respectivement les LOI et LOD.

3. Plusieurs formalismes sont possibles : citons uniquement pour information EXPRESS-G pour la représentation graphique et les langages EXPRESS pour le reste des informations d'un objet, mais également XSD ou ifcOWL [CIB W78, 2015].

La question des BIM uses est plus complexe car elle intègre à la fois des éléments du *système à faire* et des éléments du *système pour faire*. Les processus font partie intégrante des BIM uses (et des IDM). Ainsi, les univers du discours des IFC sont complétés par des univers du discours concernant les processus de gestion de l'information (acteur, validation, échange, exigence, etc.). Ces derniers subissent également une simplification. Le choix par exemple d'utiliser le BPMN¹ pour décrire les processus et échanges des BIM uses apporte une partie de ces éléments de modélisation des BIM uses. Comme pour les IFC ou le CityGML, l'utilisation d'un standard ou d'un formalisme apporte à la fois ses univers du discours ainsi que les simplification de cette réalité.

La question des standards et langages n'est pas traitée dans le détail ici (axe 3 de la modélisation en trois axes). Elle a moins d'importance pour notre proposition de MCD et de LOXi que les axes 1 et 2. Le passage de l'axe 2 à l'axe 3 dépend des outils et standards disponibles (il faut avoir présent à l'esprit que ces deux éléments sont actuellement en évolution : évolutions rapides des outils et extensions des IFC, du CityGML et du InfraGML). La mise en cohérence des simplifications des univers du discours selon les BIM uses ou selon les exigences passe également par une cohérence entre les standards utilisés. Nous retrouvons ici un argument en faveur de l'utilisation de standards ouverts et de formalismes normalisés afin de faciliter, par la suite, la conservation de cette cohérence.

6.3.3 Intégration de notre proposition de LOXi dans la démarche des trois axes de la modélisation

En nous appuyant sur l'analyse précédente du positionnement des standards IFC et CityGML ainsi que des concepts de LOD, de LODt et de BIM use, nous nous intéressons maintenant à la place que prennent les LOXi que nous proposons ci-dessus dans ce processus de modélisation en trois étapes. La Figure 6.3 illustre notre analyse et cette partie de notre proposition de MCD. On ne considère que les Objet_I, mais les autres objets du projet peuvent être également traités avec un processus similaire puisque cette modélisation en trois axes peut également être appliquée aux processus du *système pour faire*.

Ce processus de modélisation en trois axes intervient une fois que le processus de définition du *système à faire* et de son environnement est achevé (application de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences). (Pour rappel, cette approche de la modélisation est détaillée dans la section 3.2 page 66.) En effet, les exigences à traiter ainsi que les éléments contractuels et réglementaires définissent les univers du discours à considérer (point 1). (Il sera également possible d'exploiter des ontologies de domaine, construites par exemple à partir d'extraction automatique de ces documents réglementaires et contractuels : nous reviendrons sur ces possibilités dans les perspectives de notre travail.) Le passage du point 1 au point 2 se fait par simplifications de cette réalité : il s'agit du passage du réel au modèle (le modèle représente le système réel étudié, voir Figure 3.1 page 65 pour rappel). L'axe 2 est ainsi constitué de plusieurs abstractions d'un même ensemble d'univers du discours. L'utilisation des ontologies de domaine (ou des univers du discours) permet de prendre en considération, à cette phase de modélisation, les liens de généralisation entre LOA. C'est également sur ce deuxième axe que sont exploités les concepts de LOD et de LOI que nous avons redéfinis ci-dessus. La dernière transformation

1. Standards de modélisation des processus métiers. Plus de détails sont apportés dans le chapitre suivant.

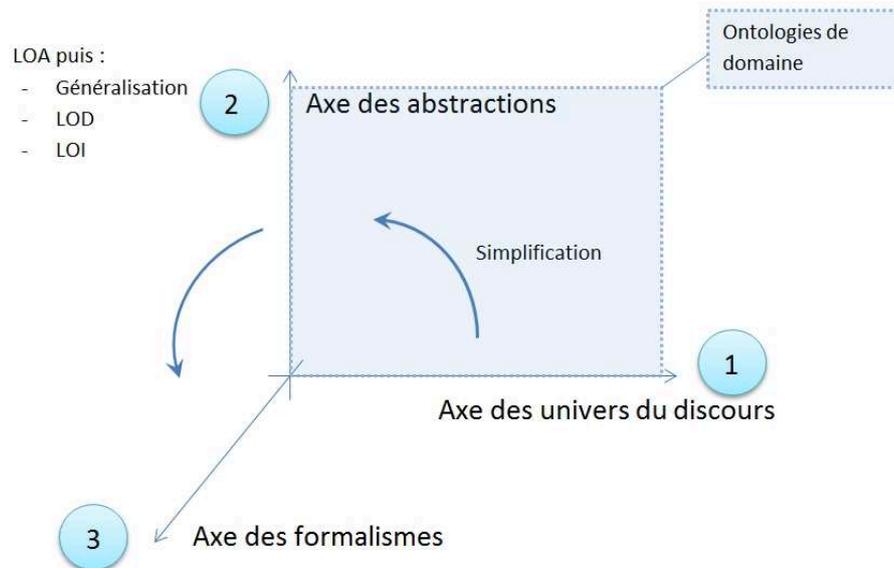


FIG. 6.3 – Application des axes de la modélisation. Intégration des LOXi dans ce processus.

entre l'axe 2 et 3 consiste à sélectionner les formalismes, formats ou langages pour modéliser totalement l'information ainsi définie. C'est uniquement suite à cette dernière étape que les MVD peuvent être définis pour les échanges d'informations. Rappelons que ce processus de modélisation ne couvre pas l'ensemble des éléments nécessaires à la définition d'un BIM use : il manque les processus du *système pour faire*.

6.4 Mise en cohérence des structuration des exigences et des Objet_I

Nous traitons ici de la structuration du *système à faire*. Ainsi, nous nous plaçons dans le domaine de la solution et devons donc considérer deux vues : la vue fonctionnelle et la vue organique. L'une et l'autre répondent aux besoins de la vue opérationnelle. Ces vues sont définies pour l'utilisation de l'ingénierie des exigences en section 4.2 page 90. Les éléments qui suivent font état d'une proposition de structuration des *Objet_I* pour le projet de conception. La partie de MCD pour l'ingénierie concourant que nous proposons ici constitue un support pour l'exploitation du concept de BIM use. Dans les figures ci-dessous, la classe *Projet* correspond à la modélisation de l'infrastructure elle-même et donc du *système à faire* : il ne s'agit pas du projet de conception global. Nous proposons une structuration du projet cohérente avec la structuration des exigences. Dans un premier temps, nous décrivons la partie de gauche des deux Figures 6.4 et 6.5 ci-dessous et les liens avec la partie centrale. Dans un second temps, nous traiterons la partie droite de ces deux figures et les liens avec la partie centrale.

Dans les deux premières parties de notre travail, nous avons illustré le fait qu'un projet répondait à des besoins. Bien que ces derniers fassent partie de l'espace de la solution, nous les introduisons ici pour montrer qu'ils portent effectivement sur le projet mais également sur les Entités fonctionnelles : elles sont une réponse directe aux besoins du projet (voir Figure 6.4). Elles sont liées entre elles, ce qui donne la continuité et le fonctionnement d'une infrastructure. Elles peuvent éventuellement être composées d'autres Entités fonctionnelles pour détailler la réponse aux besoins. Par exemple, un échangeur peut être détaillé en bretelles, rétablissement, etc. afin de répondre plus en détail aux exigences précises de connexion avec le réseau routier existant. Les LOA contraignent toute la structuration de l'information modélisant l'infrastructure à partir de la définition des univers du discours. Les LOD et LOI permettent ensuite d'affiner les informations sémantiques et géométriques décrivant ces Entités fonctionnelles et *Objet_I*, y compris les relations topologiques.

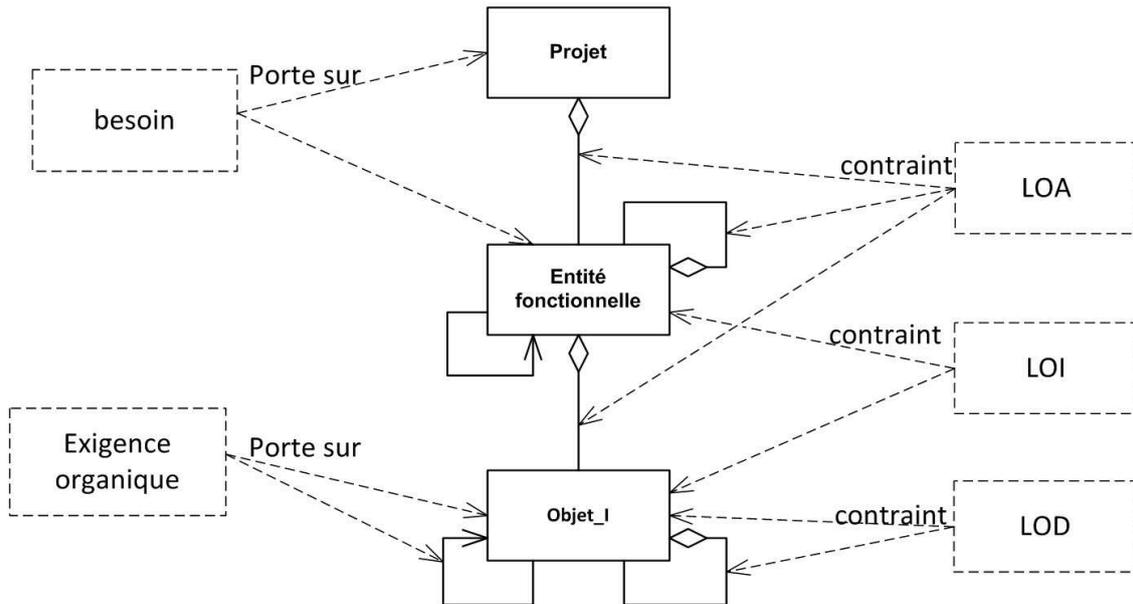


FIG. 6.4 – Structuration des classes d'objet pour la modélisation organique d'un projet d'infrastructure. Illustration de la cohérence avec les vues opérationnelle et organique de la structuration des exigences et intégration de la proposition des LOXi. Voir illustration applicative en Figure H.1 Annexe H.

La transcription des besoins en exigence détermine les différentes fonctions que l'infrastructure doit fournir une fois réalisée. Les Systèmes répondent à ces fonctions (vue fonctionnelle). Cette arborescence ne contient pas les entités fonctionnelles bien que les Systèmes leur appartiennent ou les traversent. Cette Figure 6.5 ne montre que la structuration des éléments du système à faire satisfaisant aux exigences fonctionnelles. Le lien entre les Systèmes et les Entités fonctionnelles est modélisé plus bas dans la Figure 6.6. Les Systèmes peuvent être composés d'autres Systèmes ou liés à d'autres Systèmes. Ils peuvent être existants ou faire partie du système à faire. Les exigences fonctionnelles portent sur les Systèmes qui répondent aux fonctions du projet ainsi que sur les connexions entre Systèmes : par exemple le système d'alimentation électrique relie le système de collecte d'un péage avec le centre de recettes. Cette relation entre Systèmes est également sujette à des exigences.

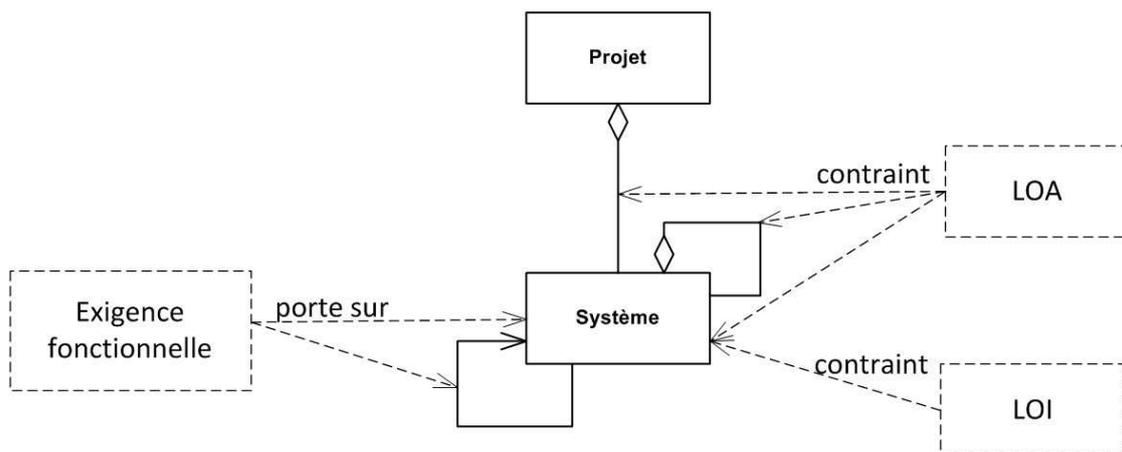


FIG. 6.5 – Structuration des classes d'objet pour la modélisation fonctionnelle d'un projet d'infrastructure. Illustration de la cohérence avec la vue fonctionnelle de la structuration des exigences et intégration de la proposition des LOXi. Voir illustration applicative en Figure H.2 Annexe H.

Ensuite, les Entités fonctionnelles ont un rôle fonctionnel mais également physique : par exemple un rétablissement permet de rétablir le trafic : c'est une réponse à un besoin de rétablissement du trafic lorsque la nouvelle infrastructure franchit une infrastructure existante. Cela se traduit concrètement par la construction d'objets physiques (ouvrages d'art, talus, chaussée, etc.). Ainsi, les Entités fonctionnelles sont composées d'Objet_I. Les exigences organiques portent directement sur ces éléments (voir Figure 6.4). Les systèmes nécessitent également des éléments physiques pour exister. Ils sont donc également constitués d'Objet_I mais nous avons fait le choix de ne pas tout représenter sur une même figure. Ainsi on retrouve cette relation dans la Figure 6.6 mais pas dans la Figure 6.5 : cette dernière ne traite que de la réponse apportée pour les exigences fonctionnelles. Il est plus logique d'intégrer les Objet_I dans la Figure 6.4 puisque les entités fonctionnelles ont également un rôle de spatialisation des Objet_I.

Enfin, rappelons un point évoquée dans le chapitre 4 à propos du phénomène d'émergence de l'analyse systémique. Cette dernière ne nous concerne par directement dans cette recherche, mais chaque Entité fonctionnelle a un rôle et des fonctions spécifiques complémentaires qui ne sont pas portées par la simple somme des Système et Objet_I qui la composent. Elles répondent également à des exigences spécifiques. Ainsi, nous justifions à nouveau

- le fait de conserver l'objet Entité fonctionnelle dans notre modélisation, pour refléter au mieux l'infrastructure réelle,
- l'utilisation du concept de *système* tel que défini par l'ingénierie système (section 4.1 page81) pour modéliser la multitude de réseaux et d'objets fonctionnels qui composent une infrastructures ou sont en interaction avec elle.

Passons maintenant à l'explication de la partie droite des deux Figure 6.4 et 6.5 : comment s'intègrent les LOXi proposés dans cette structuration des éléments du *système à faire*? Tout d'abord, comme le montrent ces deux figures, les LOA interviennent à tous les niveaux de la structuration. La définition des univers du discours sélectionne les éléments considérés pour définir l'infrastructure, tant du point de vue fonctionnel (Entités fonctionnelles et Systèmes) que physique (Entités fonctionnelles et Objets_I), ainsi que les attributs de ces entités. Les LOI ne traitent que de l'information de chaque objet. Ils ne portent donc que sur les classes et non sur les compositions ou les liens entre classes. Enfin, les LOD interviennent sur la modélisation visuelle des Objet_I. Ils interviennent également sur la décomposition des Objet_I mais sous le contrôle des LOA : cela correspond aux différentes décompositions d'un objet du concept de LOD de CityGML.

Donnons maintenant des éléments complémentaires sur la Figure 6.6 partiellement évoquée ci-dessus. Il existe chaque fois plusieurs liens entre les classes Entité fonctionnelle, Système et Objet_I. Cela traduit la difficulté à réellement extraire les concepts de système, d'espace et d'objet de l'Entité fonctionnelle. Nous rendons également manifeste que les liens entre ces classes sont plutôt relationnels que de composition. Nous indiquons ainsi que selon l'univers du discours et le LOA, ces compositions sont volatiles. Un Système, qu'il soit existant ou totalement conçu pour le projet, qu'il soit partiellement ou entièrement dans l'Entité fonctionnelle, peut appartenir (liaison forte quasiment de composition) ou simplement s'inscrire dans cette Entité fonctionnelle qui évoque alors l'espaces qu'elle représente et non la fonction qu'elle supporte.

Cette structuration peut toujours être discutée. En effet, nous avons dû faire des choix en nous appuyant sur d'autres tentatives et sur nos premières expérimentations sur projet. Cette proposition est expérimentée sur deux exemples en partie quatre de ce mémoire. Nous pouvons maintenant détailler plus finement la partie du MCD proposé qui décrit exclusivement les Objet_I.

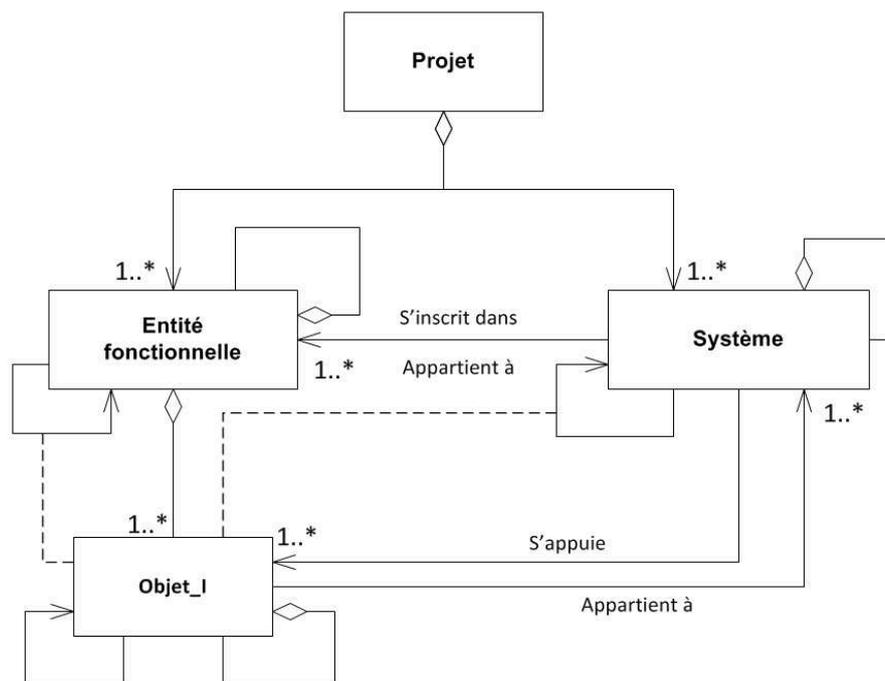


FIG. 6.6 – Relations multiples entre les classes d'objets de la décomposition fonctionnelle et de la décomposition organique d'un projet d'infrastructure. Voir illustration applicative en Figure H.3 Annexe H.

6.5 Proposition d'un modèle conceptuel pour Objet_I en cohérence avec les LOXi

Nous prenons dans cette section l'Objet_I comme point d'entrée de notre description afin de décrire son intégration dans l'écosystème de concepts que nous proposons depuis les exigences jusqu'aux différents sous-concepts des LOXi.

La Figure 6.7 montre la partie de notre proposition de MCD qui concerne directement les Objet_I du système à faire. L'élément central est ici l'Objet_I. Cette classe d'objet peut avoir des attributs. Ils ne sont pas traités dans ce travail mais, comme cela a été évoqué plus tôt, la nécessaire réutilisation des standards existants nous invite à ne redéfinir ni les classes, ni les attributs des objets manipulés. Rappelons seulement qu'en plus d'attributs très classiques comme le matériau et des performances, il est possible d'assigner un attribut de phase à l'objet ou de statut puisqu'il s'inscrit dans des processus collaboratifs. Ces Objet_I modélisent des objets concrets qui seront construits. Ils possèdent donc une existence spatiale et une géométrie, modélisées par le pictogramme de PERCEPTORY (ne connaissant pas l'objet, la forme est inconnue et donc ce pictogramme aborde un point d'interrogation ; voir section 3.8 page 77). La classe d'Objet_I se compose avec elle même puisqu'il existe une agrégation de ces objets comme décrit dans les standards de structuration de l'information étudiés précédemment. Nous introduisons également un objet *gabarit* qui représente l'emprise (surfaccique ou volumique) de l'Objet_I. Le gabarit s'avère être un concept indispensable pour de nombreuses analyses comme l'encombrement pour l'exploitation ou la faisabilité technique en construction. Ensuite, notre deuxième partie sur l'ingénierie des exigences évoque les exigences auxquelles les objets réels, construits, et donc également leur modélisation au travers des Objet_I, se doivent de répondre. Donc un Objet_I répond à ou doit être conforme à au moins une exigence (organique). Un objet répond nécessairement à au moins une exigences (organique, déclinaison d'une exigence fonctionnelle), sinon sa présence dans le modèle

n'est pas justifiée. Par contre comme nous ne détaillons pas pour plus de lisibilité le type d'exigence, une exigence n'est pas nécessairement affectée à un *Objet_I* : elle concerne potentiellement les Entités fonctionnelles ou les Systèmes (pour des compléments sur l'allocation des exigences selon leur type, on peut se référer à la section précédente et aux Figures 6.4 et 6.5). Si une exigence porte sur un *Objet_I* quelconque, elle porte également par hérité sur les *Objet_I* qui le composent. Rappelons seulement qu'une Entité fonctionnelle répond à une ou plusieurs exigences opérationnelles ou à un ou plusieurs besoins. Les Systèmes répondent à au moins une exigence fonctionnelle : leur utilité vient bien de la réponse qu'ils apportent par rapport à un besoin traduit dans une ou plusieurs exigences fonctionnelles.

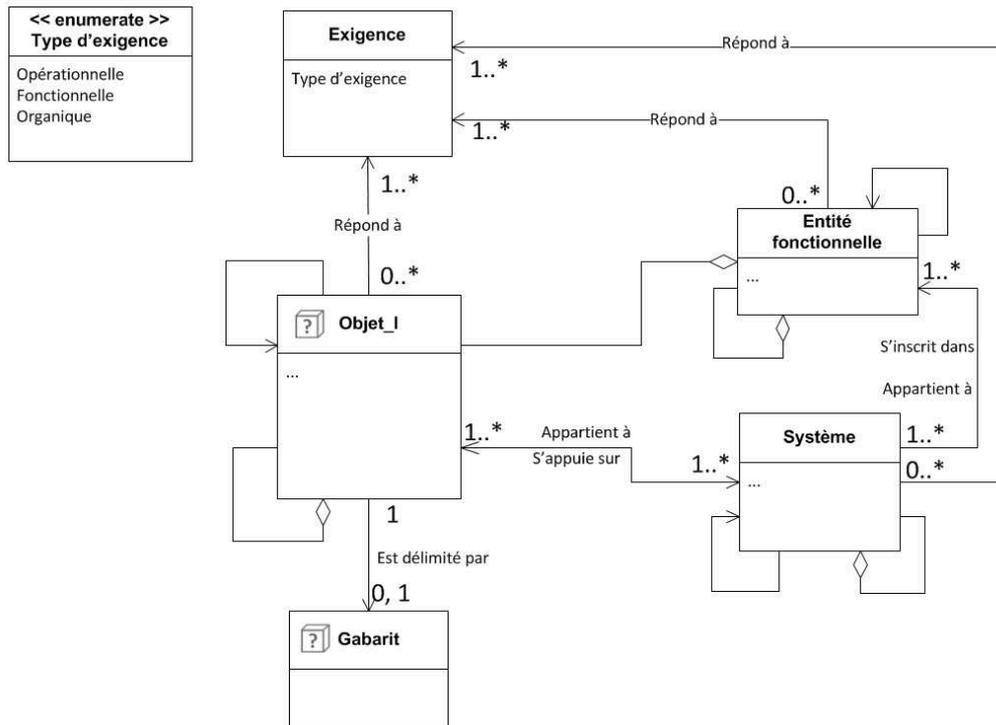


FIG. 6.7 – Proposition de MCD pour les *Objet_I* : détail des relations entre un *Objet_I* du système à faire et les systèmes et Entités fonctionnelles du projet. Voir illustration applicative en Figure 7.19.

Ensuite, en lien avec les standards existants et notre proposition détaillée dans la section précédente, les *Objet_I* sont liés aux Entités fonctionnelles et aux Systèmes (voir également la Figure 6.6). Un Système qui par définition est un ensemble d'objets s'appuie sur 1..* *Objets_I* et non 2..* pour être cohérent avec la définition, « un ensemble d'objets », puisqu'un *Objet_I* peut être composé d'autres *Objet_I*. Les trois classes principales de cette figure sont sujettes à une agrégation avec elles-mêmes et à une relation avec elles-mêmes. Ces relations sont variables selon la classe : il s'agit principalement de relations topologiques. Nous ne détaillons pas cette spécificité ici mais certains travaux ont traité cela plus en détail [Parent *et al.*, 1997 ; Laplanche, 2002 ; Miralles, 2008]. On pourra s'en inspirer pour améliorer notre proposition de MCD sur ce sujet. Mais ce travail devra se faire en étroite relation avec les exigences. La topologie sert principalement à contrôler la cohérence des objets et des systèmes en réponse à des exigences.

Enfin, nous avons évoqué dans notre analyse des LOD de CityGML et des LODt (ou du couple LOD - LOI), six sous-concepts indispensables à la structuration et à la modélisation de l'information pour notre MCD. Nous avons redistribué ces sous-concepts dans notre proposition de LOXi. Intéressons nous maintenant à leur impact sur cette proposition de MCD centré sur l'*Objet_I* du système à faire.

1. Complexité géométrique : présente dans le pictogramme de PERCEPTORY (gérée par le LOD).

2. Dimensionnalité : *idem* complexité géométrique ; (gérée par le LOD, contrainte par le LOA).
3. Apparence : *idem* complexité géométrique ; (gérée par le LOD et est fonction du LOI).
4. Sémantique : on retrouve la sémantique des Objet_I au travers du lien d'agrégation avec lui-même (hiérarchisation des classes) et de leur appartenance aux Entités fonctionnelles ou aux Systèmes. Ce sont les univers du discours ou les ontologies de domaine qui définissent au départ la sémantique nécessaire. Elle est donc gérée par le LOA.
5. Présence : la présence dans le modèle n'est pas gérée par cette partie du MCD ; (gérée par la définition des univers du discours et des LOA).
6. Attributs : les attributs des différentes classes sont portés par cette partie du modèle mais non définis ici, l'objectif étant toujours de rester cohérent avec les standards existants. La définition des attributs relatifs à chaque classe est un travail fastidieux qui est fait au travers de la définition des objets des standards ouverts comme les *IFC*, *IFC road*, *IFC alignment* ou *IFC bridge* ; ils sont gérés par le LOI.

Dans notre proposition présentée dans ce chapitre, nous avons réparti les différents sous-concepts identifiés comme composant de manière implicite ou explicite les LOD, LOI - LOD ou LODt dans nos LOXi. Nous avons également proposé une manière de modéliser (simplifier la réalité des univers du discours) en trois étapes pour préciser l'utilisation de ces LOXi. Toutefois, le concept redéfini de LOD contient toujours trois sous-concepts. Bien qu'ils traitent tous trois de la représentation visuelle et qu'une certaine cohérence soit nécessaire entre eux, il est nécessaire de travailler plus en détail cette partie de notre proposition. En effet, la modélisation visuelle doit être réfléchie pour refléter correctement ce que l'on cherche à représenter. Dans l'Annexe F, nous proposons quelques pistes de réflexion pour que la représentation visuelle permette aux acteurs du projet de bien comprendre le *système à faire* en cours de conception. De cette manière, la représentation visuelle participe réellement au travail de conception et apporte un outil supplémentaire pour l'échange et la compréhension de l'information du projet. Elle ne reste pas un simple artifice visuel et devient un outil complémentaire d'analyse de l'information.

Conclusion de la troisième partie

Étant donné l'objet de notre étude - les infrastructures linéaires - notre travail se doit d'intégrer des concepts de structuration de l'information issus de plusieurs horizons : géomatique, géotechnique, conception routière, conception de bâtiment, etc. Dans cette partie, nous avons confronté plusieurs types de niveaux, provenant de ces horizons, pour décrire et structurer l'information relative à chaque BIM use (« niveau de détail », d'information, de développement, de définition). Nous avons étudié de nombreux travaux sur ces types de niveaux afin d'identifier les éléments communs et les recouvrements de concepts. Beaucoup de travaux sont en cours sur ces sujets mais aucun ne propose une solution de fond sur l'organisation des données, d'autant moins qu'ils sont en lien avec le traitement des exigences. D'ailleurs, la confusion qui entoure leurs définitions respectives implique des interprétations nombreuses, non propices à la cohérence d'un modèle conceptuel et à l'interopérabilité. Nous avons donc procédé à une analyse de ces différents concepts et conservé ou réorganisé les éléments pertinents en lien avec notre problématique. Il s'est avéré que pour la modélisation des projets d'infrastructure, ces définitions n'étaient pas suffisamment bien posées pour servir le projet. De plus, les recouvrements multiples nécessitaient une nouvelle proposition plus globale pour apporter une cohérence à l'utilisation de ces différents niveaux. Nous avons donc proposé de nouveaux niveaux sur la base de ceux existants. Cette redéfinition est faite en cohérence avec le processus de modélisation en trois étapes et la structuration des exigences de produit présentés en deuxième partie.

Ces niveaux tels qu'ils sont définis actuellement amènent à des structurations arborescentes des objets. Nous avons vu par la définition de notre problématique que la définition du contenu des BIM uses, qui permettent de sélectionner les informations pertinentes dans le modèle complet, nécessite une structuration plus complexe qu'une simple hiérarchie arborescente. La question du développement d'ontologies pour compléter notre proposition émerge régulièrement dans notre analyse dans l'optique d'intégrer la transversalité des acteurs et leurs multiples points de vue. Nous rappelons ici les visions fonctionnelles ou organiques notamment. Elles sont appliquées simultanément à la structuration des exigences et aux décompositions du projet en *Objet_I* : cette démarche apporte une cohérence dans la définition du contenu des BIM uses. Notre proposition de structuration des objets du *système à faire* en Entité fonctionnelle, *Objet_I* et *Système* facilite également l'identification des éléments pertinents pour chaque BIM use ainsi que l'allocation des exigences qui ne peuvent toutes porter sur des *Objet_I*. En effet, une structuration des objets, basée uniquement sur une hiérarchie des *Objet_I*, n'est pas cohérente avec la structuration des exigences en trois vues de l'ingénierie des exigences. L'application en quatrième partie de cette structuration du MCD pour les *Objet_I* montrera la pertinence de ces deux classes complémentaires à celle des *Objet_I*. Cette structuration peut ainsi être complétée par le développement d'ontologies de domaine spécifiques à chaque métier ou exigence.

Dans une optique de continuité de l'information sur tout le cycle de vie, l'information créée en suivant notre proposition se doit d'être cohérente avec la structuration utilisée pour les autres phases, construction et exploitation. Les processus et la définition du cadre proposés en deuxième partie sont

applicables directement puisqu'il s'agit d'une approche par les exigences et par les systèmes. Seuls les *systèmes à faire* et *pour faire* changent mais leurs relations sont similaires. Dans d'autres industries utilisant ces outils, cette continuité existe également. En ce qui concerne la structuration des classes Objet_I, Entité fonctionnelle et Système, cette continuité sur tout le cycle de vie reste à démontrer par l'intermédiaire d'autres cas d'usage pratiques non réalisés dans notre travail. La conception se base sur les besoins et exigences qui ont donné naissance au projet mais cela ne couvre pas le champ des exigences de gestion de patrimoine ou des travaux d'exécution par exemple. Nous concluons que notre proposition de démarche proposée en fin de deuxième partie est applicable à d'autres phases. Ce n'est pas directement le cas pour notre proposition de structuration du MCD proposé dans cette troisième partie.

Quatrième partie

IMPLÉMENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE CONCEPTUEL
DANS UN CONTEXTE INDUSTRIEL

Introduction de la quatrième partie

Dans les deux parties précédentes, nous avons proposé une méthodologie basée sur des outils conceptuels provenant d'autres industries ainsi qu'une structuration de l'information en lien avec celle des exigences. Nous évoquons également la nécessité de décrire le contenu des BIM uses pour exploiter au mieux le BIM. Dans cette quatrième partie, nous appliquons notre proposition sur deux cas d'usage. Cette vérification de l'applicabilité de notre proposition se base sur le retour d'expérience des expérimentations menées tout au long de ce travail de thèse.

Cette partie débute avec une synthèse des définitions existantes de ce qu'est un BIM use, éléments évoqué à plusieurs reprises. Cette analyse précise la définition donnée en première partie. Il était nécessaire d'étudier d'autres éléments constitutifs des BIM uses, comme les niveaux de détail et de développement, avant de les définir eux même et d'établir les objectifs auxquels ils permettent de répondre. Le concept de BIM use est fondamental dans l'exploitation opérationnelle du BIM mais sa définition et sa place dans le projet ne sont pas si simples à établir. En effet, un BIM use regroupe à la fois des objets, des processus de conception et des processus spécifiques au suivi de la qualité de l'information. Il fait donc partie du modèle conceptuel du *système pour faire* et utilise des éléments du *système à faire*. Après avoir établi une définition claire de ce qu'est un BIM use, nous appliquons notre proposition de méthode et de modèle conceptuel dans des cas d'usage. Ces applications permettent de vérifier si notre proposition permet de correctement définir et décrire le contenu des BIM uses d'un projet.

Pour conclure cette introduction, citons le biochimiste Joseph Henderson qui avait un jour formulé cette remarque :

La science doit d'avantage à la machine à vapeur que la machine à vapeur ne doit à la science.

Autrement dit, nos abstractions intellectuelles ne sont souvent que des explications de ce dont nous faisons déjà l'expérience dans nos inventions technologiques. Dans notre contexte, les expérimentations préliminaires ont largement alimenté la réflexion conceptuelle et ont contribué à notre proposition finale. Elles ont également permis de cibler les cas d'usages les plus pertinents à traiter. La fin de cette partie est consacrée à la synthèse des modifications apportées à notre proposition de méthode et de modèle suite à cette application.

Définition et utilisation des BIM uses

Avant de procéder à l'application de notre proposition sur deux cas d'usage, nous apportons des éléments complémentaires à la définition du concept de BIM use. Les concepts et outils vus dans les parties précédentes permettent maintenant de comprendre les précisions que nous apportons.

7.1 Le concept de *BIM use*

7.1.1 Proposition de définition du concept de *BIM use*

Un BIM use est défini par [Kreider et Messner \[2013\]](#) comme un procédé d'application du BIM au cours du cycle de vie d'une installation pour atteindre un ou plusieurs objectifs spécifiques. Toutefois, comme l'expliquent [Kreider et Messner \[2015\]](#), le BIM ne change pas les objectifs d'un projet, mais seulement les moyens d'y parvenir, d'où la notion de *procédé d'application du BIM* utilisée dans leur définition. La définition de [Boton et Kubicki \[2014\]](#), qui travaillent sur les processus et pratiques de collaboration du BIM, définissent les BIM uses justement comme des « pratiques collaboratives ». L'utilisation de ce concept permet de réduire les coûts ou le temps de planification, d'atteindre une meilleure qualité de produit, d'augmenter la productivité ou encore d'obtenir les données nécessaires à la gestion du patrimoine [[Keung, 2013](#)]. Ainsi, les BIM uses définissant les moyens d'utiliser le BIM sont à considérer principalement comme des processus qui s'appuient sur de l'information structurée. La définition proposée dans [[Messner et al., 2013](#)] va également dans ce sens : les BIM uses sont composés des méthodes par lesquelles le BIM sera mis en œuvre pour la production, le traitement, la communication, l'exécution et la gestion des informations [...] On retrouve également cette approche dans d'autres *Guides BIM* comme celui de [Harvard University \[2013\]](#).

Dans [[Kreider et Messner, 2013](#)], les auteurs ont identifié 25 BIM uses parmi lesquels la coordination 3D, la programmation, la modélisation 4D, la gestion de patrimoine, etc. [[Boton et Kubicki, 2014](#)]. Ils sont assez généraux mais le concept n'interdit aucunement d'en définir de plus spécifiques, basés sur la réponse à des exigences précises comme développé ci-dessous. Il est à noter qu'un objet peut être concerné par plusieurs BIM uses, ce qui peut impliquer des dimensionnements contradictoires. Un BIM use peut également regrouper des objet provenant de systèmes bien différents par exemple mais devant répondre ensemble à une même exigence. Nous détaillons un cas spécifique dans la partie suivante après avoir justifié nos choix concernant les formalismes de modélisation. Dans le guide de l'Université de [Penn State \[2011\]](#), les BIM uses sont dits spécifiques à certaines phases, même si certains BIM uses comme la coordination 3D sont présents sur plusieurs phases (la coordination 3D figure dans la dernière partie de la phase de design et pendant toute la phase de construction). Nous verrons qu'il est de moins en moins pertinent d'assigner directement les BIM uses aux phases. Il est préférable d'aligner la réponse aux exigences sur le planning du projet puis d'utiliser le concept de BIM use pour répondre à ces exigences. Un BIM use évoqué à plusieurs phases à la même dénomination mais généralement

des objectifs et un contenu différents. Les définitions de ce qu'est un BIM use demeurent similaires peut importe le guide BIM utilisé : certains décrivent seulement plus en détail les éléments à définir pour chaque BIM use. Notons tout de même que nous n'avons pas identifié de documents traitant de BIM uses spécifiques aux projets d'infrastructures, les documents cités ici ne traitant que des projets de bâtiment.

Certains BIM uses sont très larges dans leur utilisation, notamment le BIM use souvent évoqué de « coordination 3D » puisqu'il concerne potentiellement tous les objets à toutes les phases du projet. En effet, la coordination répond à de nombreuses exigences et donc à des besoins et des visions du projet différents. La Figure 7.1 montre plusieurs utilisations possibles du BIM et donc potentiellement les sujets susceptibles d'exister comme BIM use. Pour le moment, les BIM uses sont sélectionnés et définis dans le contrat. Selon les besoins du client, la sélection des BIM uses à mettre en place diffèrent fortement : certains projets insistent sur la coordination 3D de zones complexes uniquement ou sur la résolution de problématiques particulières pour lesquelles le BIM est considéré comme un outil apportant des facilités de résolution. L'exploitation contractuelle des BIM use laisse à penser, aujourd'hui encore, que les processus BIM existent en dehors des autres processus de conception. Or, ils font totalement partie de la conception et créent un lien direct entre le *système à faire* et le *système pour faire*.

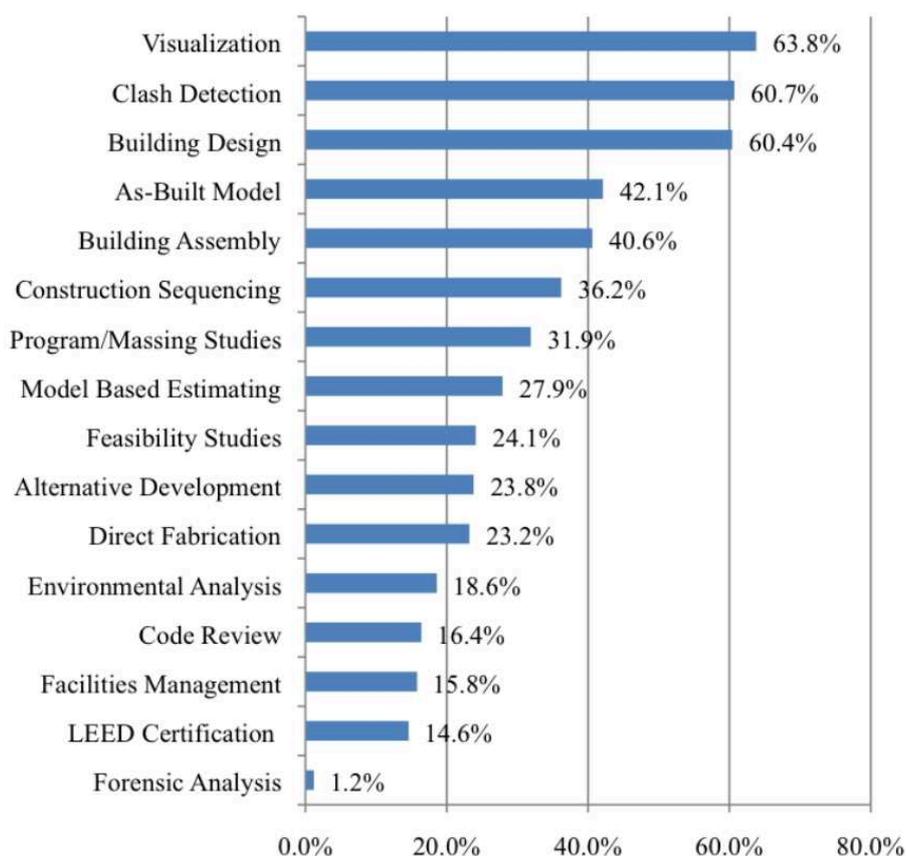


FIG. 7.1 – Tâches pour lesquelles le BIM est utilisé [sur des projets de bâtiment, puisqu'il n'existe pas d'information de ce type pour les projets d'infrastructures] d'après [Burcin et Rice, 2010]. En pratique, une majorité de ces utilisations se retrouvent dans les projets d'infrastructures.

Dans le document de Kreider et Messner *The Uses of BIM : Classifying and Selecting BIM Uses* [Kreider et Messner, 2013], les BIM uses se définissent par de nombreux éléments tels que les objectifs

à atteindre (données à recueillir, génération d'information, analyses, diffusion de l'information) ainsi que les niveaux de développement requis, les disciplines ou métiers concernés, les responsables du BIM use, les phases concernées etc. Pour Kreider et Messner [2015], organiser un modèle de données selon les phases d'un projet présente de nombreux inconvénients. L'approche par les usages ou BIM uses est jugée plus pertinente aujourd'hui. Les auteurs identifient cinq objectifs principaux qui concernent les données : recueillir, créer, analyser, communiquer, contrôler. Ces objectifs correspondent aux étapes du cycle de vie d'une donnée. Ensuite, Kreider et Messner [2013] proposent de préciser ces objectifs au travers de la définition des objets ou systèmes concernés par chaque objectif, de la phase, des disciplines et du niveau de développement nécessaire (définition des LODt de [BIMForum, 2015]). Ainsi, les LODt des objets ne sont qu'un élément de la définition d'un BIM use. Messner *et al.* [2013] évoquent le fait que les BIM uses sont à mettre en correspondance avec le niveau de maturité des besoins définis pour chaque projet : le contenu des BIM uses est donc à adapter selon les besoins du projet. Ainsi, il n'est pas possible de définir des BIM uses totalement génériques. Comme nous l'avons proposé dans la deuxième partie, une méthode d'identification du contenu des BIM use est nécessaire.

7.1.2 Contextualisation du concept de BIM use pour les projets d'infrastructure

En préliminaire, distinguons les BIM uses et les cas d'usage. Un cas d'usage est un exercice d'expérimentation sur un sujet précis qui permet de tirer des conclusions à partir des questions initiales posées. Un cas d'usage a donc vocation à alimenter le contenu des BIM uses. Certaines similitudes existent nécessairement puisque un cas d'usage concerne un métier particulier qui répond à certaines exigences et que le BIM use a également vocation à structurer l'information et ses flux pour répondre à des exigences. Un BIM use est plus structuré et il est il peut être contractuel après une validation de son contenu.

Actuellement, les BIM uses les mieux décrits et les plus présents dans les projets interviennent dans les processus des projets de bâtiment [Penn State, 2011]. Les plus exploités et le mieux décrits sont la coordination 3D, la détection de clashes et la coordination de l'exécution des travaux (phasage, encombrement, etc.) [Burcin et Rice, 2010 ; Kreider et Messner, 2013]. Ces BIM uses correspondent aux avantages évidents de ce qu'apporte le BIM mais d'autres moins connus mais tout aussi utiles existent. Un BIM use défini pour la validation d'un permis de construire correspond parfaitement à ce que la spécification d'un BIM use permet d'exploiter : acteurs concernés, informations à échanger, circuit de validation, suivi des versions, etc. Citons également des thématiques plus orientées vers les projets d'infrastructure : dossier de réponse à la loi sur l'eau, implantation d'un passage à faune, étude de faisabilité des travaux sous circulation, etc. Concernant la détection de clash, il est pour nous difficile de ne considérer qu'un seul BIM use. En effet, les exigences diffèrent selon les Entités fonctionnelles et les Systèmes auxquels appartiennent les Objets. Dans le cas de l'assainissement par exemple, certaines zones sont étudiées en priorité pendant la phase d'AVP : zones comprenant beaucoup d'ouvrages d'art, d'autres réseaux ou interfaces métiers par exemple. A cette phase, les besoins en informations sont plus importants que les besoins classiques pour les autres zones du réseau qui ne nécessitent pas de coordination 3D. Ensuite, en phase PRO, toutes les zones sont concernées mais les clashes ne sont plus évalués uniquement avec les ouvrages de génie civil : tous sont considérés, notamment les clashes entre réseaux haute tension et réseaux d'assainissement : détection de la trop grande proximité entre ces deux types de réseaux. A la description de cet exemple, bien qu'il s'agisse d'un sujet commun à tous les acteurs, ne définir qu'un seul BIM use de coordination 3D n'a pour nous pas de sens. La définition des univers du discours relativement à des exigences rend plus pertinente la définition de BIM use qui peuvent intégrer une partie de coordination 3D. Rappelons que les projets d'infrastructures diffèrent des projets de bâtiments. Les interfaces sont plus nombreuses et les limites de l'ouvrage restent plus floues que pour les bâtiments. En conséquence, les interactions entre systèmes avec des gouvernances

différentes sont nombreuses. Les BIM uses acquièrent ainsi une plus grande importance.

Ensuite, les BIM uses sont trop orientés par les apports directs de la mise en place du BIM alors que toutes les exigences d'un projet peuvent être traitées et contrôlées au travers de BIM uses. Un BIM use est un scénario à jouer avec des rôles et des acteurs bien identifiés pour créer et échanger des informations en adéquation avec des exigences à résoudre ou à contrôler. En appliquant notre proposition de méthode pour la définition du contenu des BIM uses, l'ensemble des BIM uses ainsi définis doivent permettre de répondre à l'ensemble des exigences. Ils concilient les exigences de processus avec les exigences du produit à concevoir. Les BIM uses décrivent les points suivants :

- l'information à produire (quoi) ;
- quel acteur produit l'information (qui) ;
- quel acteur va utiliser l'information (pour qui) ;
- le moment où elle doit être produite et diffusée (quand) ;
- comment elle est contrôlée.

C'est un concept pertinent dès qu'une exigence concerne plus d'un acteur, ce qui est systématique dans un projet d'infrastructure. Plusieurs acteurs, cela implique plusieurs univers du discours avec les simplifications et les abstractions qui en découlent. Afin de déterminer ces éléments (univers du discours, modélisations et abstractions), nous avons proposés dans notre deuxième partie d'utiliser l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences pour définir l'environnement d'un système étudié et les exigences qui s'y rapportent. Étudier une partie du *système à faire* et la partie du *système pour faire* qui s'y rapporte revient à définir un BIM use (voir Figure 7.2). La modélisation en trois axes proposée dans cette même partie (section 3.2 page 66) s'impose également pour la définition des BIM uses : définition des univers du discours concernés et utilisation si elles existent d'ontologies de domaine, simplification de ces éléments, niveaux d'abstraction et représentation de l'information (LOXi), ainsi que choix des formalismes et langages de modélisation. Définir les BIM uses revient donc à identifier les éléments pertinents ainsi que leurs représentations pertinentes pour répondre de la manière la plus efficace aux exigences.

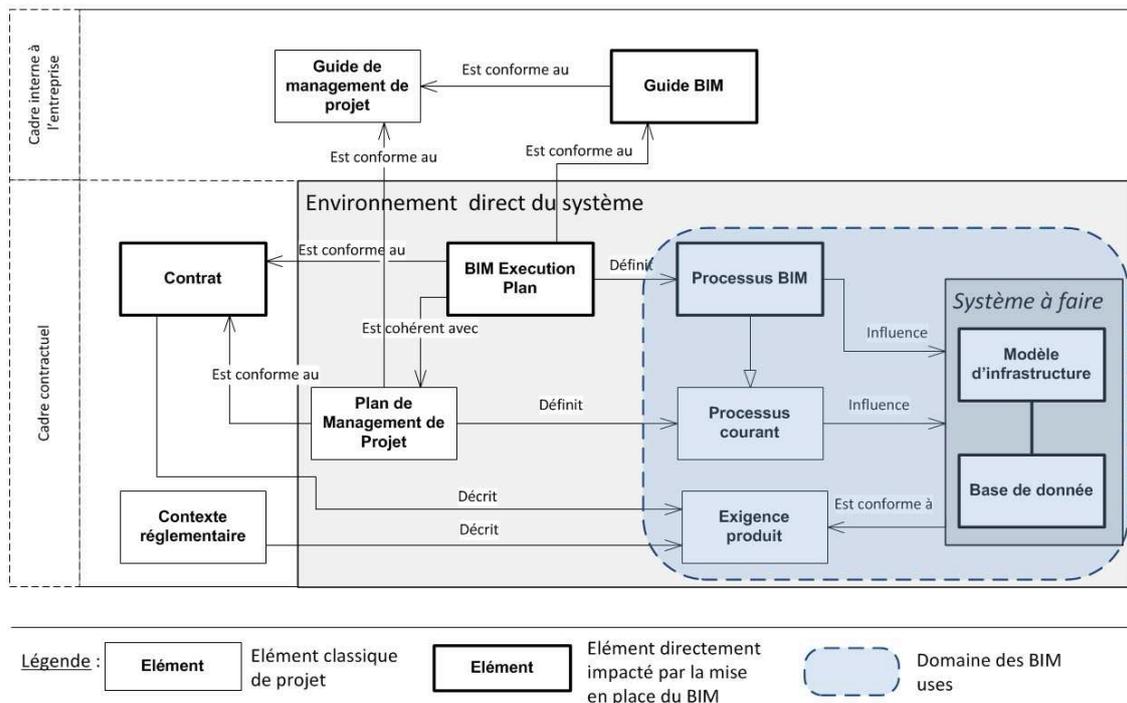


FIG. 7.2 – *Domaine d'impact des BIM uses : ils décrivent et contiennent le lien entre le système à faire et son environnement.*

Selon nous, il n'est pas pertinent de définir un BIM use pour chaque exigence. Un BIM use correspond plutôt à l'exploitation des objets et processus BIM pour répondre aux besoins du projet et aux exigences fonctionnelles les moins détaillées. Les exemples traités ci-dessous illustrent bien l'ampleur d'un BIM use : bien que l'étude acoustique et la préparation à l'audit de sécurité soient traitées en premier lieu comme des cas d'usage, ils sont à considérer comme deux BIM uses du projet. En effet, ces deux cas d'usages traitent de grandes exigences réglementaires qui sont respectivement la limitation de l'impact sonore conformément à la réglementation et la justification d'une conception sécuritaire pour les usagers de la nouvelle infrastructure. La Figure 7.2 montre clairement la place des BIM uses dans le projet de conception : ils sont en lien direct avec le BEP qui les décrits précisément, le PMP qui décrit l'organisation de l'ensemble des activités de conception et avec le contrat et la réglementation qui définissent les besoins et les exigences.

7.1.3 Objectifs de cette approche par les BIM uses

La définition actuelle des BIM uses minimise leur importance dans la structuration et la gestion de l'information. Les cas d'usage traités ci-dessous permettent d'alimenter notre Modèle Conceptuel de Données (MCD) proposé dans les parties II et III au travers des classes du MCD d'Objet_I, Entité fonctionnelle ou Système par exemple. Cette approche pratique basée sur des cas d'usage (bottom-up) vise également à valider le MCD proposé. Donc, pour chaque cas, nous allons chercher à :

- définir les instances des classes Objets_I, Système et Entité Fonctionnelle, ce qui sélectionne les objets et informations pertinents (liste des besoins pour la définition des LOA, LOD et LOI) et une partie de l'ontologie métier ;
- définir tout ou partie des besoins et exigences relatifs à ces instances, ce qui alimentera l'ensemble des exigences à considérer ;
- vérifier la proposition des deux structurations de décomposition d'un projet d'infrastructure (conséquence des trois vues de l'ingénierie système, voir Figures 6.5 et 6.4) ;
- alimenter le processus générique de définition des BIM uses.

Notre approche est différente pour chaque cas d'usage. L'objectif n'était pas de définir toutes les entités possible pour un projet d'infrastructure mais bien d'évaluer la robustesse de notre proposition face à des sollicitation variées. Voici les différents sujets que nous avons identifiés pour sélectionner les cas d'usage à traiter :

1. relations entre les exigences, les objets et leur modélisation et les échanges d'informations (cas des études acoustiques),
2. relations entre les exigences, les objets et leurs modélisations, les phases du projet (cas de la préparation à l'audit de sécurité),
3. relations entre les exigences d'exploitation, les objets et les échanges d'informations (cas des chaussées),
4. relations entre les objets et leurs modélisations, les phases du projet (cas des réseaux d'assainissement),
5. relations entre les objets et leurs modélisations, les phases du projet, le niveau d'information pertinent et les exigences pour l'exploitation des maquettes numériques de synthèse (cas des revues de projet technique).

Seuls les deux premiers cas sont développés ci-dessous. Les cas d'usages permettent également de définir la modélisation de l'information en lien avec la partie F.1 page 260 concernant la visualisation et la représentation de l'information. Les cas d'usage traités ci-dessous concernent plusieurs exigences dont certaines sont plus large que le métier concerné par chaque cas d'usage. Ainsi, un cas d'usage permet d'alimenter, même de manière limitée, plusieurs BIM uses. De cette manière, la cohérence entre les modélisations portées par les BIM uses (sur le *système à faire* et sur les processus du *système pour*

faire) peut être contrôlée. Nous verrons dans les perspectives comment progresser vers un contrôle automatique.

7.2 Formalismes utilisés pour les expérimentations

Nous évoquons deux formalismes qui seront évoqués et exploités dans la quatrième partie de ce mémoire pour la descriptions des expérimentations.

7.2.1 Le BPMN : Business Process Model and Notation

Le BPMN (Business Process Model and Notation) est un standard de l'OMG (Object Management Group) (comme l'UML : tous deux sont d'ailleurs compatibles). Son but premier est de proposer une notation facilement compréhensible par les opérationnels pour leur permettre de décrire les premiers éléments de processus plus techniques. Il sert de facilitateur à la compréhension entre la définition des processus et leur implémentation technique [Object Management Group, 2011] (voir illustration en Figure 7.3).

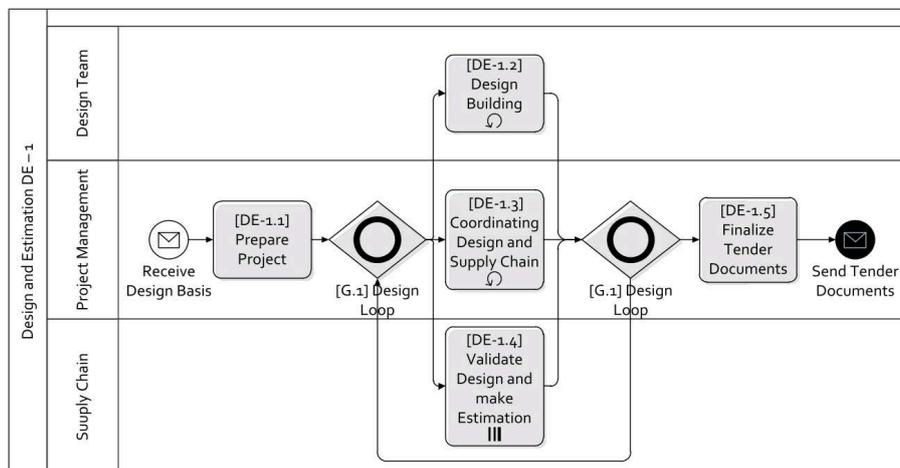


FIG. 7.3 – Exemple de processus de conception décrit en BPMN. Figure extraite de [Berard et Karlshoej, 2011].

7.2.2 Le SADT : Structured Analysis and Design Technique

Le SADT (Structured Analysis and Design Technique) est essentiellement utilisé dans le domaine des processus industriels [Kubicki, 2006]. Contrairement au BPMN, il permet de modéliser des séquences et des itérations alors que le BPMN est surtout dédié aux séquences. D'après Badreau et Boulanger [2014], c'est une approche fonctionnelle descendante qui va du général (« boîte noire ») au particulier (« boîte blanche »). Badreau et Boulanger décrit la pertinence de l'utilisation du SADT dans un contexte de définition des exigences et spécifications fonctionnelles. Il indique par exemple que la méthode met l'accent sur les interfaces entre exigences et permet d'éviter les défaillances d'interfaces. Nous aurons toutefois une utilisation différente du SADT. Suite à nos premières expérimentations, nous proposons d'ajouter au SADT quelques éléments. Comme le montre la Figure 7.4, les entrants et sortants sont ici les objets manipulés, décrits avec le formalisme UML et PERCEPTORY. Nous pouvons ainsi suivre les transformations géométriques et sémantiques des objets dans leur workflow. Nous verrons l'utilité de cette proposition dans les cas d'usage de la quatrième partie de ce mémoire.

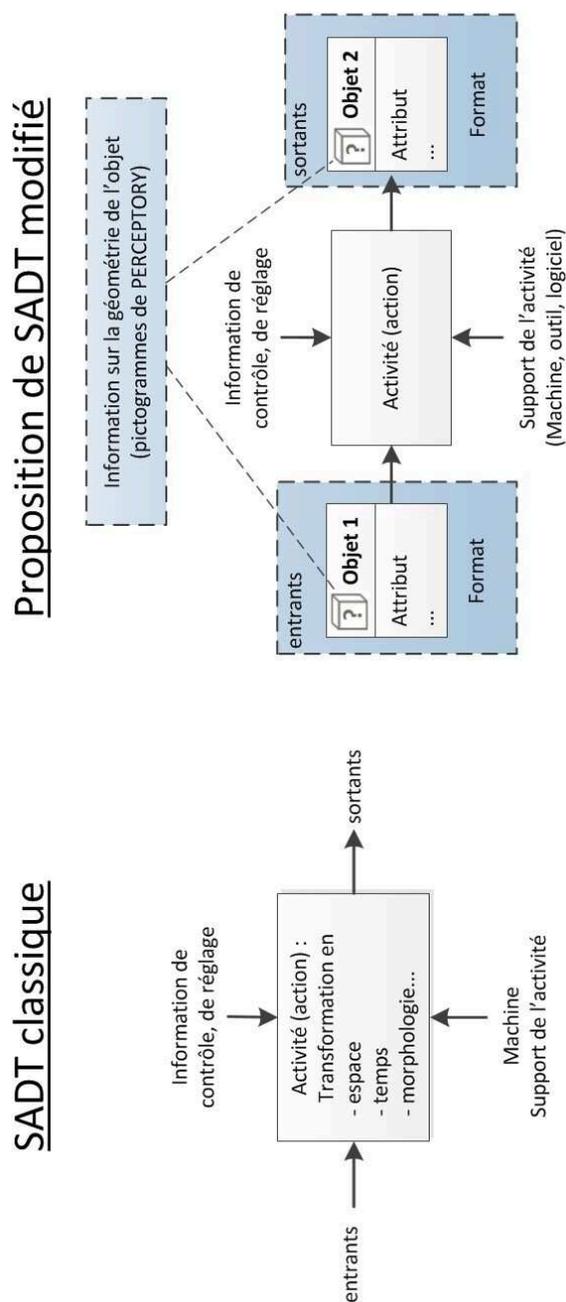


FIG. 7.4 – Légende de diagramme SADT modifié utilisé pour le cas d'usage « Étude acoustique » (voir section 7.3 page 174).

Deux cas d'usages sont détaillés ci-dessous. Ils exploitent les outils conceptuels définis dans la deuxième et la troisième parties. Nous avons retenu deux cas spécifiques afin d'obtenir deux exploitations différentes de notre proposition sur le même projet et les mêmes données. Le premier cas d'usage traite des études acoustiques et de la réponse à la réglementation. Cette première expérimentation se concentre sur la modélisation 3D des objets, leurs représentations et les transformations qu'ils subissent lors des études acoustiques. Il s'agit de définir les éléments nécessaires au BIM use de dimensionnement des protections acoustiques. Ce cas est assez restreint en terme d'acteurs et de données concernées. Il permet surtout d'évaluer l'approche de délimitation du système étudié et d'analyse des besoins. Le second cas d'usage concerne la préparation à l'audit de sécurité. Il permet de contrôler la cohérence entre

le traitement des exigences et la structuration des Objet_I. De nombreux objets et acteurs interviennent dans ce BIM use. Ce BIM use est également très évolutif puisqu'il est présent à toutes les phases du projet, mais avec des exigences croissantes. Nous évaluons ainsi notre proposition au travers de deux approches pratiques complémentaire.

7.3 Le cas des études acoustiques

Le travail présenté dans cette section relative aux études acoustiques a en partie été réalisé dans le cadre de la première année de travail du cas d'usage 6-1 du projet MINnD. Il se base sur le projet actuellement en cours de la rocade L2 à Marseille. Le BIM use traité au travers de ce cas d'usage d'analyse des études acoustique a été retenue pour plusieurs raisons. Les exigences sont bien définies dès le début du projet dans des documents de référence réglementaires. Ensuite, les processus d'analyse et de dimensionnement des protections acoustiques sont largement éprouvés. Ainsi, notre analyse n'est pas perturbée par des instabilités dans l'appréciation de la réponse aux exigences comme cela est possible pour la préparation de l'audit de sécurité.

Les études acoustiques et la mise en place de mesures de réduction de bruit s'inscrivent dans un cadre réglementaire : elles sont soumises à obligation de résultats. L'État peut volontairement imposer la mise en place des mesures spécifiques de réduction du bruit en complément de la réglementation. Le Maître d'Ouvrage ou certaines parties prenantes ont également la possibilité d'agir de manière similaire. Cela peut consister en la préconisation d'un type de protection particulier, la définition d'un seuil plus restrictif que la réglementation en vigueur, la prise en compte d'un temps long pour les estimations de trafic, etc. L'analyse de ce cas des études acoustiques a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les grandes étapes d'une étude d'impact acoustique d'une infrastructure linéaire ?
- Quelles sont les données ou objets manipulés ?
- Quels sont les acteurs qui interviennent dans ce cas d'usage ?
- Par quels formats transitent ces informations ?
- Quels traitements subissent les données lors de ce processus ?
- Quels logiciels sont utilisés avec quelles séquences de tâches (entrants, modifications, sortants) ?
- Quels sont les livrables et sous quelle forme sont-ils disponibles et diffusés ?

Ces éléments servent à la définition du BIM use qui concerne les études acoustiques. Ils permettent également de répondre aux questions évoquées ci-dessus en section 7.1.3.

Les principales étapes d'une étude acoustique pour la création d'un rétablissement sont présentées en Figure 7.5. Une étape préliminaire de calage du logiciel d'analyse (étape 0) est nécessaire afin de :

- définir les paramètres (propriétés météorologiques, absorption acoustique du sol, nombre de réflexions) utilisés dans l'outil ;
- calibrer les paramètres du modèle interne de l'outil de calculs acoustiques pour être cohérent avec les mesures faites sur site ;
- calibrer les propriétés phoniques des murs existants et des revêtements routiers.

7.3.1 Méthodologie d'étude

Le cas d'usage décrit ici permet d'alimenter la définition de plusieurs BIM uses non spécifiques aux études acoustiques comme la coordination 3D (détection de clashes). Toutefois, le BIM use que nous traitons en priorité concerne uniquement le dimensionnement des dispositifs anti-bruit comme les murs, les matériaux spéciaux pour la chaussée ou la protection des façades. Notre travail sur ce cas d'usage s'organise en trois approche complémentaires illustrées dans la Figure 7.6. La première permet

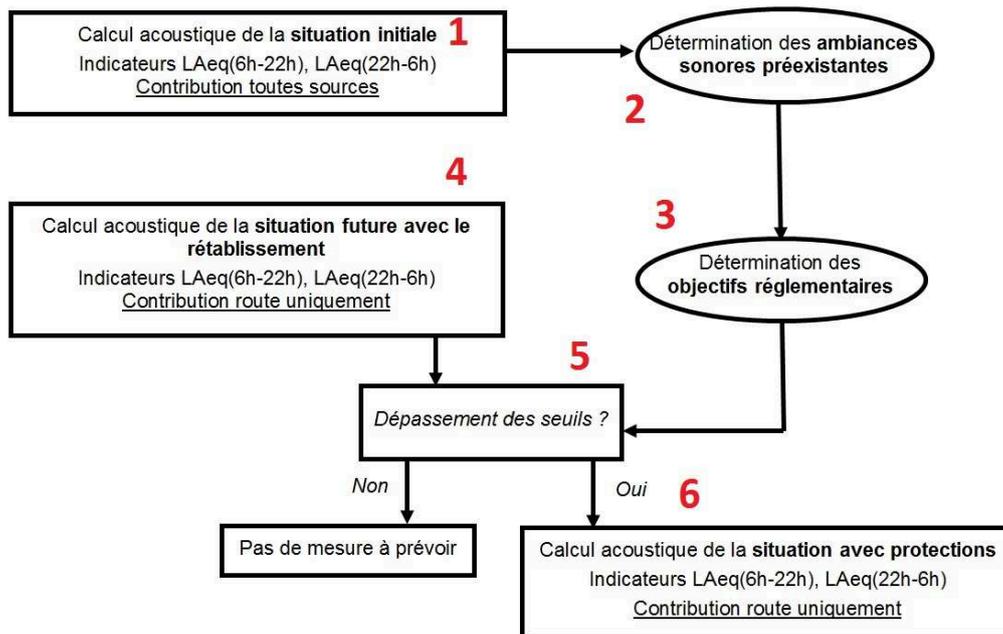


FIG. 7.5 – Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement. Au travers de ces étapes, le BE Acoustique définit le type de mur antibruit (réfléchissant ou absorbant), l'épaisseur et la hauteur de crête. Cela afin de répondre à une exigence qui devra être respectée malgré les modifications des murs antibruit pour des considérations architecturales et paysagères.

au travers de la définition des cas d'utilisation (formalisme UML) de définir les besoins en information pour l'étude acoustique. De cette manière, sont identifiées principalement les exigences réglementaires et contractuelles concernant le *système à faire* . Ce dernier est ainsi étudié comme une boîte noire. La seconde approche identifie les transformations subies par les objets relatifs à l'étude de bruit : la description de cette partie des workflow des objets est décrite avec le formalisme proposé ci-dessus (utilisation simultanée du formalisme SADT, des diagrammes de classes de l'UML et des pictogrammes de PERCEPTORY ; voir Figure 7.4 pour rappel). Ce formalisme modifié permet l'identification des liens entre les objets manipulés et les transformations qu'ils subissent. Les pictogrammes de PERCEPTORY illustrent les transformations géométriques des objets en terme de dimensionalité. Ainsi, sont identifiées les points bloquants qui limitent la qualité de l'information échangée et créée dans ce processus de dimensionnement des protections acoustiques : la description des processus et des exigences de processus pour ce cas d'usage est possible. En étudiant les éléments en interaction avec le *système à faire* , modélisé ici comme une boîte blanche, nous pouvons en établir les aspects structurels et temporels (voir section 4.1.1 page 85 pour rappel sur ce concept). La troisième approche donne lieu à la définition des utilisations des objets de l'étude acoustiques dans un contexte de coordination et d'évaluation des propositions métier dans le contexte global du projet (lien avec le cas des revues de coordination et des autres BIM uses du projet). Elle traite de la représentation visuelle des informations pour une exploitation en coordination et validation des données.

Cette démarche s'appuie sur les principes de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences explicités en section 4.1 page 81. Le système étudié ici comprend l'ensemble des données liées aux études acoustiques ainsi que le modèle de ces données (ces dernières sont principalement dédiées à la définition d'une réponse technique à la réglementation sur le bruit). Le système étudié est nommé « système de protection acoustique » (voir Figures 7.7 et 7.8 pour son intégration dans le projet).

Pour résumer, ces étapes vont nous permettre de définir les éléments des trois axes de la modélisation évoqués en section 3.2 page 66 :

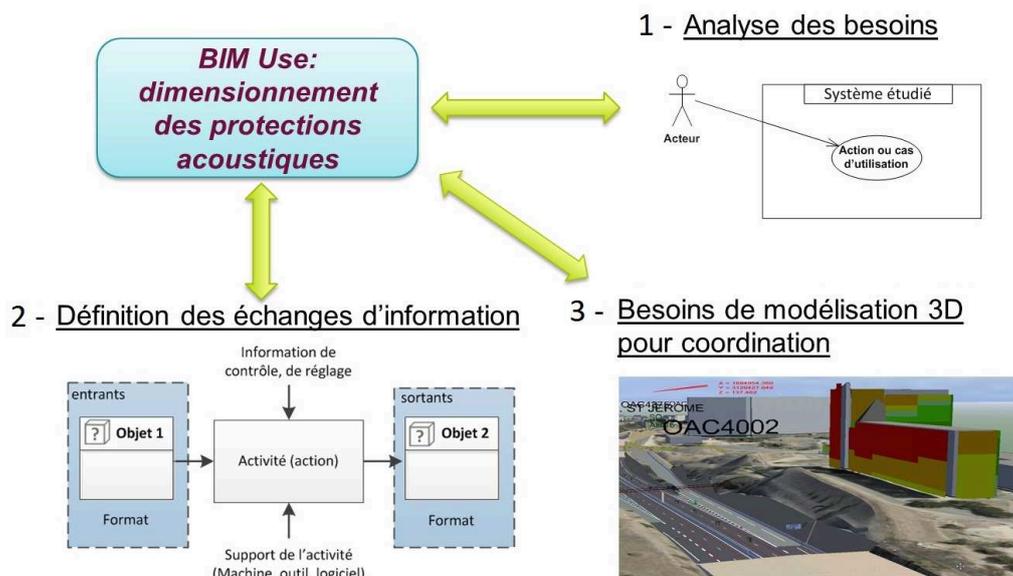


FIG. 7.6 – Approche triple pour l'identification des besoins et des échanges du cas des études acoustiques. Ces trois approches permettent d'identifier les besoins en terme d'utilisation du système (modèle de données et données), d'échanges d'information et d'exploitation visuelle dans des outils de coordination.

1. identification des éléments à considérer à partir de l'évaluation des besoins et échanges d'information ;
2. simplification de ces éléments et abstractions utilisées (contraintes dues à la réglementation, aux acteurs ou outils) ;
3. formalismes et formats utilisés pour échanger les informations sujettes aux exigences réglementaire du traitement des nuisances sonores.

7.3.2 Définition des besoins

Les acteurs directement concernés par ce cas d'usage sont :

- BE acoustique : acteur central de ce cas d'usage ;
- Direction des études : bureau d'étude maîtrise d'œuvre ;
- BE air : bureau d'étude des pollutions aériennes ;
- BE GC : bureau d'étude génie civil ;
- BE Faune flore : bureau d'étude de l'impact du projet sur l'environnement naturel ;
- Bureau maquette : acteur responsable de l'intégration des objets et données dans la maquette numérique de synthèse ;
- Direction de projet ;
- Direction des études.

Autres acteurs :

- Architecte et/ou paysagiste ;
- MOA : Maîtrise d'Ouvrage ;
- Entreprise de travaux ;
- Administrations territoriales : CETE, CEREMA, DREAL, etc. ;
- Riverains.

Le système étudié a été divisé en trois sous-systèmes qui correspondent aux trois espaces présentés à la Figure 2.2 page 47. A noter que cette décomposition est en partie contrainte par les solutions logiciels

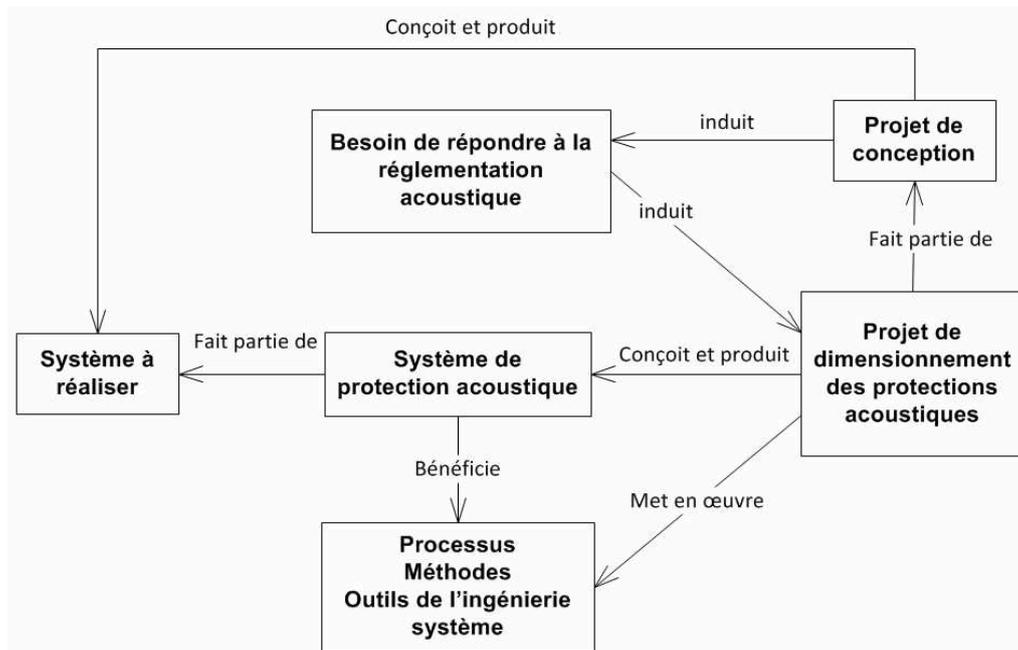


FIG. 7.7 – Relation entre le projet d'étude acoustique (système pour faire), sous-projet du projet de construction de l'infrastructure, le système à faire du projet d'étude acoustique et l'ingénierie système.

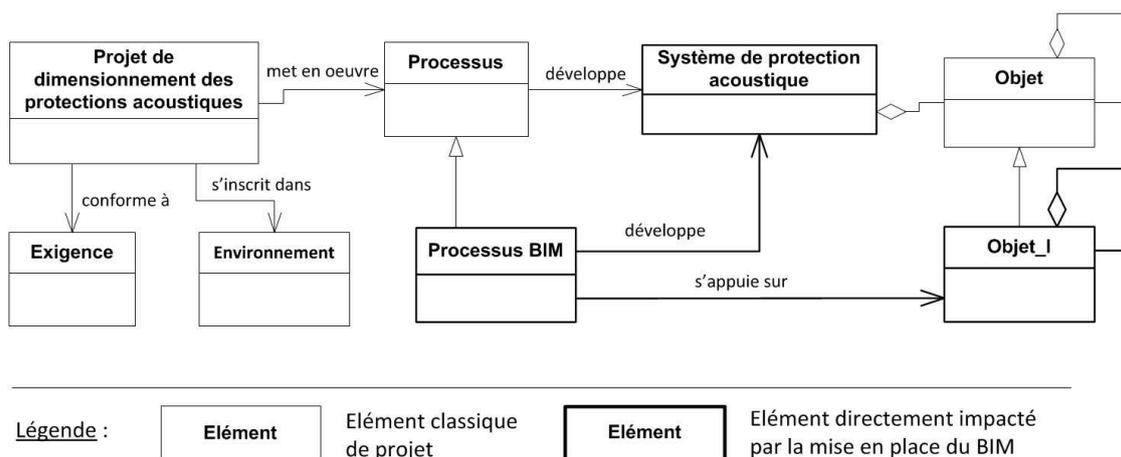


FIG. 7.8 – Mise en contexte du système étudié (système de protection acoustique, dit « système à faire ») avec identification du lien avec les objets étudiés dans le cas des études acoustiques.

du projet considéré (Rocade L2 Marseille), ce qui ne devrait pas être le cas d'une réflexion ingénierie système, normalement réalisée sans considération des solutions techniques. Mais nous traitons ici un cas concret, dans le domaine de la solution et ces trois éléments considérés font partie de la solution actuelle pour le travail collaboratif du *système pour faire*. Voici les *systèmes* étudiés (au sens des systèmes pour les cas d'utilisation de l'UML) :

1. Le modèle métier (c'est-à-dire modèle réalisé dans le cadre de l'étude acoustique dans l'outil métier utilisé par le BE, ici CadnaA¹) : Figure 7.9, qui correspond à l'espace de conception de la Figure 2.2 ;
2. Les sortants de l'outil métier : Figure 7.10, qui correspond à l'espace de partage de la Figure 2.2 ;

1. CadnaA est une solution logicielle pour le calcul, l'évaluation, la prévision et la présentation de l'exposition acoustique et de l'impact des polluants dans l'air.

3. Maquette numérique de coordination (intégrant les sortant de l'étude acoustique) : Figure 7.11, qui correspond à l'espace de coordination de la Figure 2.2. Pour ce cas d'utilisation, ne sont évoquées que les actions relatives aux données de l'étude acoustique.

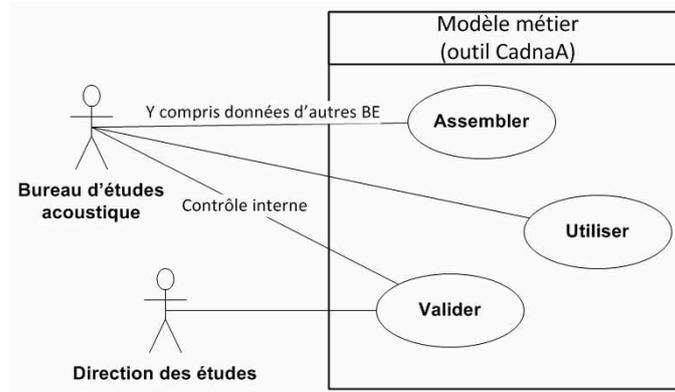


FIG. 7.9 – Cas d'utilisation pour le modèle métier de l'outil CadnaA.

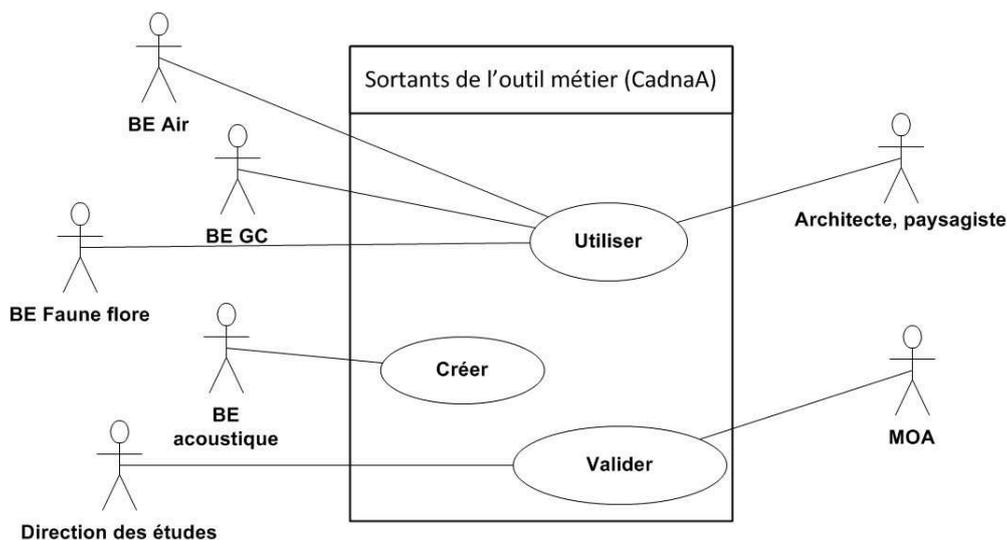


FIG. 7.10 – Cas d'utilisation pour tous les sortants de l'outil métier, contractuels ou non.

Quelques commentaires sont nécessaires pour la compréhension de ces trois Figures :

- Figure 7.9 : nous avons distingué le contrôle interne du BE du contrôle externe : les objectifs de validations sont différents ainsi que la fréquence de validation, plus importante en contrôle interne.
- Figure 7.10 : les actions ne portent pas toutes sur les mêmes objets : l'architecte paysagiste utilisera principalement les propositions de murs acoustiques alors que le BE Air utilise le modèle CadnaA créé pour l'étude acoustique pour ses propres études (il ne s'agit donc pas d'un sortant contractuel). Les liens avec le BE Faune flore sont pour le moment assez faibles dans la réutilisation des données mais des travaux engagés dans l'UC 6 du projet MINnD portent sur cette question.
- Figure 7.11 : nous avons différencié les termes « consulter » et « utiliser ». La consultation principalement d'acteurs publics étrangers au contrat est à titre informatif, de communication. L'utilisation de la MN de synthèse porte sur des aspects plus techniques de l'exploitation des

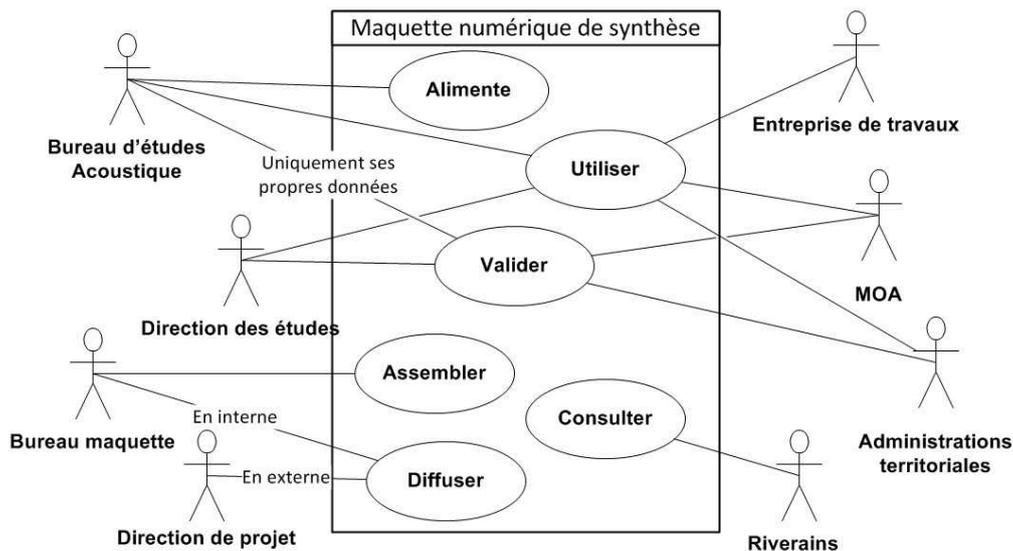


FIG. 7.11 – Cas d'utilisation pour une maquette numérique de synthèse (actions relatives uniquement aux données acoustiques).

données. La diffusion interne de la MN signifie au sein des équipes de conception contrairement à la diffusion externe plus large.

7.3.3 Développement des exigences : élucidation et sources d'exigences

La définition de ces cas d'utilisation nous permet de développer les exigences relatives à ce cas des études acoustiques (élucidation et identification des sources d'exigences). Ces exigences appartiennent à plusieurs types. Nous citons quelques exemples issus de l'analyse de ces cas d'utilisation.

- « Limiter la gêne pour les riverains à X dB » (exigence réglementaire de produit).
- « Partager les données de conception des ouvrages acoustiques proposés avec le constructeur » (exigence contractuelle de processus).
- « Partager le résultat des études acoustiques avec les riverains » (exigence réglementaire de processus ; cette exigence ne faisait pas partie du projet réel ni de la réglementation. Elle a été intégrée pour simuler d'éventuels changements dans la réglementation vers une diffusion de ces données dans le domaine public).

7.3.4 Liste des objets utilisés pour l'étude acoustique : lien avec les Entités fonctionnelles et les Systèmes du projet

L'approche triple proposée dans la Figure 7.6 permet l'identification de l'ensemble des objets manipulés lors des études acoustiques. Ces dernières sont réalisées par le BE Acoustique sur la base des entrants suivants :

Modèle Numérique de Terrain (MNT) : le MNT est dans un premier temps représentatif de l'état existant avant le projet (topographie du sol et nature des sols). Puis il intègre les modifications dues aux différents ouvrages et plateformes du projet. L'étude acoustique manipule deux objets distincts : le MNT avant le projet pour calculer l'état initial des niveaux de bruit, et le MNT modifié par le projet pour évaluer les modifications des niveaux sonores et les propositions de protections acoustiques.

Bâtiment existant : ils sont dans un premier temps des emprises au sol avec un attribut de hauteur du toit. Ils serviront à positionner les récepteurs pour les calculs de niveau sonore (il peut exister des bâtiments faisant partie du projet, mais ce cas est assez rare).

Plateforme existante : elles représentent le réseau viaire existant qui sera ponctuellement connecté aux plateformes du projet. Elles servent à modéliser le bruit actuel sans l'infrastructure en projet.

Plateformes du projet : elles représentent les zones roulables du projet en cours de conception (emprise de la route conçue par le projet). L'axe projet est également une donnée source qui va être l'objet porteur du bruit. Elles modifient généralement le MNT par leur emprise et aménagements en bordures (talus, fossés).

Conditions météorologiques : leur effet est mesurable dès que la distance Source au Récepteur est supérieure à une centaine de mètres et il croît avec la distance. La variation du niveau sonore à grande distance est due à un phénomène de réfraction des ondes acoustiques dans la basse atmosphère (dus à des variations de la température de l'air et de la vitesse du vent).

Interface de tranchée couverte : c'est un objet fictif pour modéliser une zone avec un comportement acoustique particulier. Cet objet est une source de bruit qui matérialise pour les calculs le niveau sonore sortant aux extrémités d'une tranchée couverte (TC).

Ouvrages de génie civil : les ouvrages d'art autres que les TC ne sont généralement pas modélisés pour l'étude acoustique : leur impact sur la diffusion du bruit n'est pas significatif ou bien est défavorable à la diffusion du bruit : il n'est donc pas utile de les prendre en compte ici.

D'autres objets sont ensuite nécessaires. Ils constituent les sortant des études acoustiques :

Mur acoustique : c'est un élément dédié à l'absorption ou à la réflexion des nuisances sonores. Leur dimensionnement (géométrie et matériaux) et leur implantation sont la finalité de l'étude acoustique.

Récepteur acoustique : ce sont des objets ponctuels créés dans l'outil d'analyse acoustique. Ils sont placés à 2 m en avant des façades des bâtiments évalués et pour chaque étage des bâtiments sensibles au bruit (logement, santé, éducation). Ils servent à l'outil de modélisation acoustique de points de calcul pour produire des résultats explicites (valeurs de niveau sonore selon les différents scénarios).

Isophone : c'est une représentation particulière de la modélisation des études de bruit. Ils peuvent être déployés sur tout le linéaire du projet ou bien seulement sur de petites zones qui nécessitent une attention particulière (discussion avec les élus ou riverains par exemple).

Ces objets sont ensuite affectés aux Systèmes qui les concernent : la Figure 7.12 synthétise ce travail. dans le cadre de l'étude acoustique, ces objets n'appartiennent qu'à un seul Système. Par contre, la définition d'autres BIM uses crée des liens entre ces objets et d'autres Systèmes extérieurs à cette étude. Ensuite, pour alléger le schéma, nous n'avons pas introduit la classe *Entité fonctionnelle*. Dans une étude acoustique, soit tout le projet est concerné, soit uniquement quelques zones particulière. L'ajout de cette classes n'apporte rien à la structuration de l'information dans ce cas. Ici nous considérons donc que tous les objets de la Figure sont liés à l'Entité fonctionnelles *Protection acoustique*.

Le Système auquel sont reliés tous les objets dans ce cas d'usage doit être conforme aux exigences réglementaires. Lors d'une modification de cette exigence (du niveau de bruit dans la réglementation par exemple), la reprise des études acoustiques est facilitée. Cette appartenance permet également d'uniformiser le « niveau de détail » demandé pour la modélisation des objets d'un même système pour par exemple, les mettre en évidence dans une modélisation visuelle. Ensuite, la géométrie de ces objets, et principalement leur dimensionalité, ne peut être facilement exprimée comme nous allons le voir ci-dessous. Ces objets subissent de nombreuses transformations et leur modélisation varie selon les besoins (modélisation dans l'outil métier, partage des informations ou modélisation pour de la coordination).

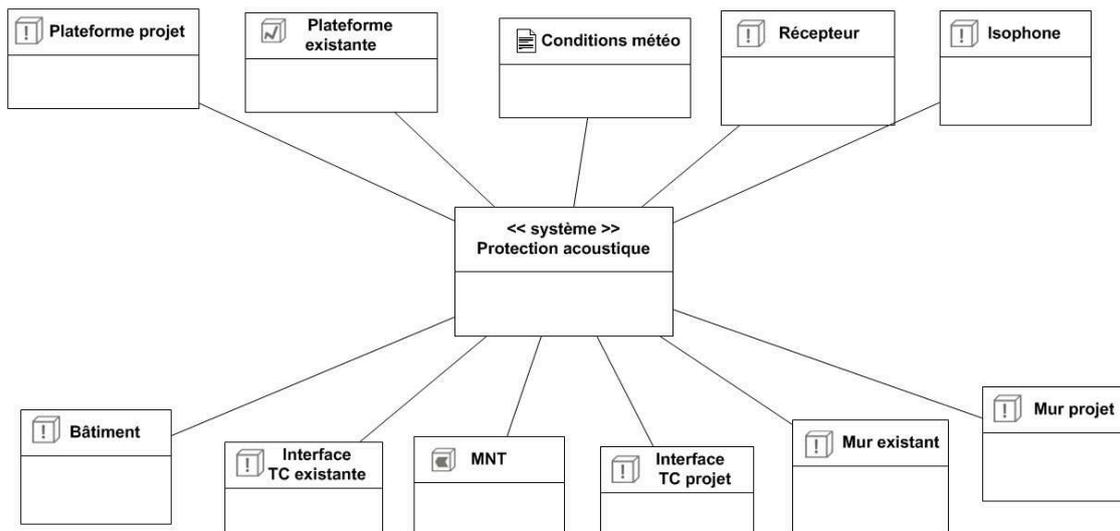


FIG. 7.12 – Cette figure reprend les classes d'objets relatives à l'étude acoustique complétées des pictogrammes de PERCEPTORY (voir section 3.8 page 77 pour rappel). Les pictogrammes avec un point d'exclamation indiquent que la géométrie des Objets_I de la classe est « complexe » et qu'elle ne peut être détaillée ici. Cela vient des nombreuses transformations de dimensionnalité et de géométrie que subissent les Objets_I (voir section 7.3.5). Le type de trait qui matérialise les liens entre les Systèmes et les Objets_I n'a pas de signification particulière : cette distinction sert seulement à faciliter la lecture. Les flèches ne sont pas non plus dessinées pour alléger la représentation mais conformément au modèle proposé en Figure 6.6 page 157, elles sont toutes dans le sens « Objets_I » vers « Système » et portent la mention « appartient à ».

7.3.5 Analyse des processus de transformation de l'information

Pour décrire les échanges d'informations et d'objets, nous utilisons le formalisme proposé dans la Figure 7.4 page 173. La Figure 7.13 ci-dessous traite le cas du mur acoustique, objet central des sortants d'une étude acoustique. L'étude des autres objets est présentée dans l'Annexe I.

Voici les conclusions qui peuvent être tirées de l'analyse du workflow de tous ces objets. Tout d'abord, quelques problèmes ou incohérences sont récurrents dans les entrants comme les relevés de l'existant. C'est le cas par exemple pour les données permettant de modéliser le MNT (il peut exister quelques points avec une altitude de 0 mètres par exemple), les bâtiments (également quelques problèmes possibles d'altitude de certains points) ou les intersections de routes ou voies ferrées, etc. qui peuvent contenir des incohérences. Un lissage et une modification manuelle de certains éléments est nécessaire pour avoir un projet propre compréhensible par le logiciel. Ensuite, dans CadnaA les attributs d'occupation des bâtiments existants sont contrôlés manuellement pour vérifier la cohérence avec l'occupation réelle. Il peut exister des incohérences entre les données et la réalité. De plus, dans certaines classifications comme celle de l'IGN, il existe de nombreux types d'occupation. Le BE acoustique n'a besoin que de cinq catégories qui sont : habitation, bâti à vocation d'enseignement, bâti de santé et bureaux et autre (ces familles correspondent à celles des seuils réglementaires). Ces données sont donc à renseigner à la main par l'opérateur de CadnaA. Une majorité des attributs saisis dans CadnaA le sont de manière manuelle à la fois à cause de problématiques d'outil (les imports possibles ou non) et de problématiques de données (les données fournies ne sont pas nécessairement dans leur forme la plus pertinente pour l'intégration ; voir Annexe I page 271). Enfin, la préconisation, qui correspond généralement à une proposition d'isolation en façade, est ajoutée suite à la réalisation de l'étape 6 lors de la première itération de l'étude (voir Figure 7.5). Les livrables de ces préconisations sont généralement des tableaux ainsi que des cartes. Ces informations ne sont donc pas liées directement aux objets.

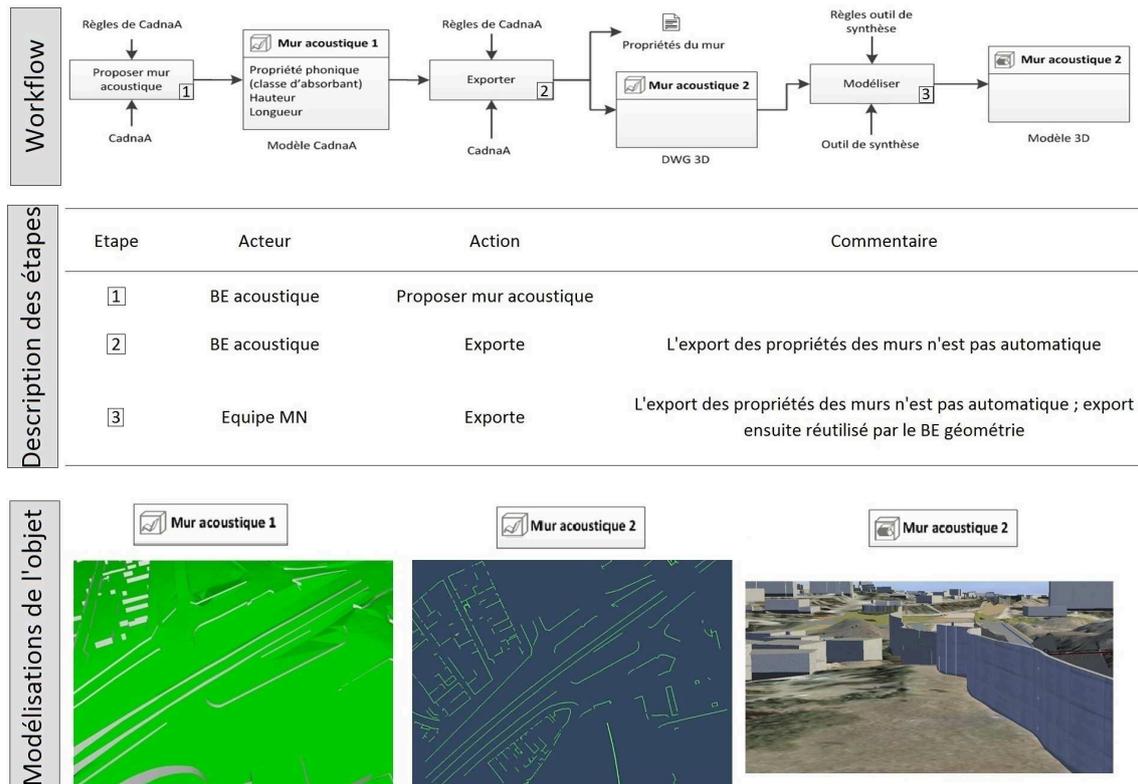


FIG. 7.13 – Exemple de description du workflow suivi par un *Objet_I* « mur anti-bruit » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

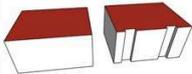
Pour chaque variante, une saisie manuelle des attributs des objets est nécessaire. Par exemple pour une nouvelle variante de tracé, le BE acoustique reprend manuellement l'ensemble du modèle topographique du nouveau tracé qu'il doit traiter à nouveau avant de l'intégrer dans le modèle métier. Les données trafics et paramètres de voies (largeurs, type de revêtements, etc.) sont également ressaisies manuellement. Du fait des difficultés d'intégration des données évoquées ci-dessus, la mise à jour du modèle pour l'étude acoustique est moins fréquente que la mise à jour de la géométrie du projet. Il est à noter que cela vient également du fait que les temporalités de la conception entre le BE acoustique et le BE géométrie sont bien différentes : le BE géométrie travaille en permanence sur le projet alors que le BE acoustique n'est sollicité que ponctuellement. Sur certains projets, il peut être envisagé d'exporter le modèle CadnaA pour intégration dans l'outil d'étude de la qualité de l'air mais des problèmes d'interopérabilité et de cohérence des données subsistent : par exemple, les données de trafic sont différentes pour l'acoustique et pour l'air. Cela vient du fait que les analyses ont des objectifs différents mais cela nécessite à nouveau des ressaisies de données alors que l'on modélise les mêmes objets géométriques. Enfin, CadnaA ne peut pas être directement connecté à une GED, ce qui rend difficile la gestion du workflow, des versions et du statut des fichiers : cela limite le travail collaboratif.

Concernant l'intégration des données, elle n'est pas facilitée par la trop grande précision des données d'entrée par rapport aux besoins du point de vue attributaire, trop de classes pour les bâtiments par exemple, mais surtout du point de vue de la complexité géométrique : l'outil ainsi que le modèle de calcul ne considère pas les géométries trop complexes. Pour faire le lien avec les LOD de CityGML tels que définis actuellement, les bâtiments arrivent dans le modèle CadnaA avec un LOD au moins de 2 alors qu'un LOD1 suffit amplement, surtout pour les études de qualité de l'air.

Le Tableau 7.1 reprend les besoins en information pour deux BIM uses différents mais relatifs à

l'étude acoustique. Le premier concerne les besoins en terme de modélisation dans l'outil CadnaA pour lancer les calculs de simulation. La complexité géométrique des éléments ne doit pas être trop élevée, cela perturbe inutilement les calculs d'impact sonore. L'apparence n'a aucune importance ainsi que la sémantique puisque les calculs ne portent que sur les volumes. Les attributs sont par contre nécessaires puisqu'ils définissent les conditions de l'étude (trafic, matériaux, etc.) Lors d'une détection de clashes entre les murs acoustiques proposés et le reste des Objets_I du projet, la complexité géométrique n'est pas non plus nécessairement la plus élevée : elle est à évaluer selon l'avancement de la conception et des outils de détection (informatique ou humain, comme précisé dans la section 5.2.1 page 131). Par contre, le BE acoustique ne donne que la hauteur de crête du mur par rapport au MNT : le gabarit complet du mur n'existe donc pas alors qu'il est nécessaire pour cette détection de clashes avec les objets en sous-sol. L'apparence n'a pas d'importance ni les attributs des objets. La sémantique des objets est indispensable pour la compréhension et le traitement des clashes. Le sous-concept d'existence n'est pas traité ici puisque les objets concernés sont au préalable sélectionnés pour ce BIM use grâce aux concepts d'univers du discours et de LOA. Nous montrons ainsi que l'utilisation des LOD ou LODt tels que définis actuellement (avec une dépendance entre les sous-concepts qui les composent) n'est pas possible pour la définition des BIM uses (voir Tableau 7.1).

TAB. 7.1 – Identification des besoins pour deux BIM uses différents dans le cadre de l'étude acoustique (les LOD évoqués ici sont ceux de CityGML, afin d'avoir une référence normalisée pour appuyer notre argumentation).

Sous-concept	complexité géométrique	dimensionnalité	apparence	sémantique	attributs
illustration				Objet générique ou détaillé Appartenance à un système ou ensemble...	Activité (pour un bâtiment), type (pour une route) Matériau...
Dimensionnement des protections acoustiques	LOD1 ou LOD2	 ou 	/	/	Propriétés du mur
Détection de clashes entre murs acoustiques et autres objets	LOD défini comme pertinente		Compréhensions de la scène pour un opérateur humain	Maximum possible	/

7.3.6 Synthèse et conclusion pour ce cas d'usage

L'étude de ce cas d'usage a permis d'identifier les points qui freinent l'interopérabilité et perturbent les workflows. Au travers du prisme de l'ingénierie système défini au Chapitre 4, cette analyse a été facilitée grâce à l'établissement clair des besoins et exigences à traiter. Les problématiques ainsi soulevées constituent les points à améliorer dans l'optique d'une définition précise du BIM use de dimensionnement des dispositifs anti-bruit. Certains éléments n'ont pas été définis comme la description des échanges entre acteurs au travers de diagrammes BPMN : ce travail qui concerne le *système à faire* reste à produire mais les éléments pour conserver une continuité dans la qualité de l'information sont déjà identifiés par le traitement de ce cas d'usage. Il manque également une proposition plus précise de la gestion des exigences mais ce travail ne peut être traité qu'une fois plusieurs cas d'usages et BIM uses définis, au même titre que la proposition d'une structuration pertinente des objets. Il ne manque donc selon nous que peu d'éléments pour finaliser la description de ce BIM use et des IDM correspondants à l'étude acoustique.

Ce travail permet d'alimenter de nombreux éléments du « système à faire » et de son environnement, et donc par conséquent du « système pour faire » comme le montre la Figure 7.14 (les éléments directement impactés ou concernés par notre analyse de l'étude acoustique sont matérialisés en vert). En effet, la redéfinition des processus d'échanges de l'information induisent un impact direct sur les processus ainsi que sur les données du projet (« système à faire »).

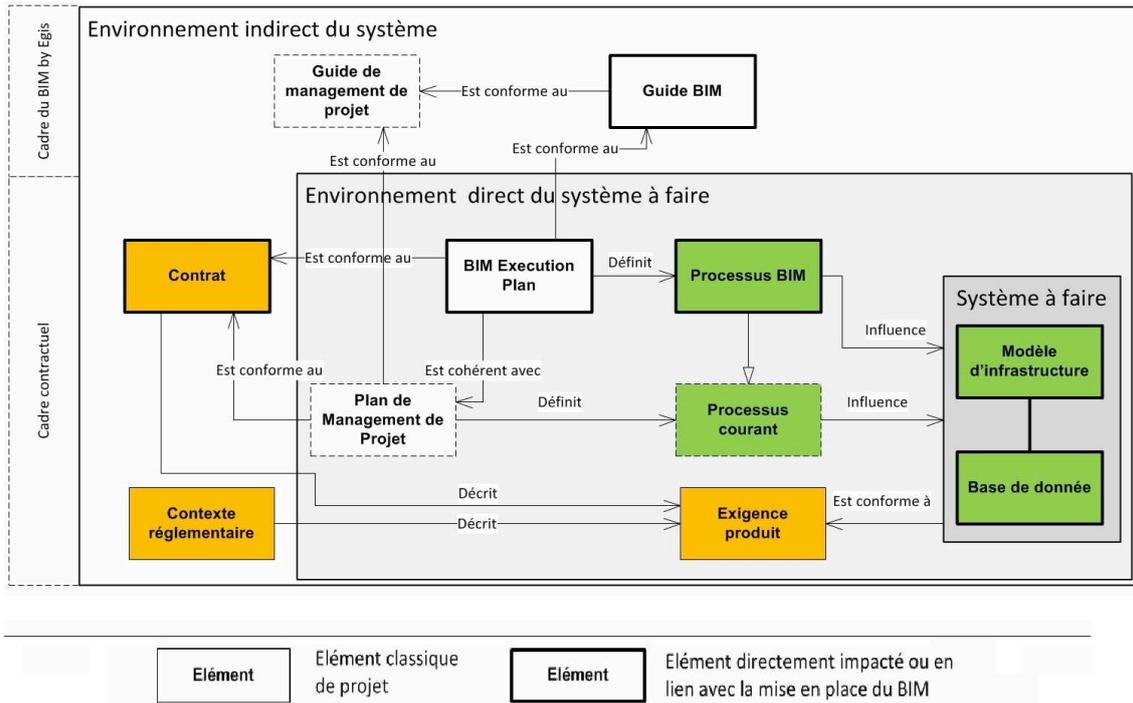


FIG. 7.14 – Les éléments directement impactés par notre analyse présentée ici sont matérialisés en vert. Les cadres en orange sont ceux considérés pour notre étude et principalement pour la définition des besoins.

7.4 Le cas de la préparation à l'audit de sécurité

Pour ce cas d'usage, nous avons appliqué intégralement notre proposition de démarche détaillée dans les chapitres précédents (ingénierie système et ingénierie des exigences pour la définition du système étudié et de son environnement et modélisation en trois axes) pour la définition du BIM use et de la structuration du *système à faire*. La préparation de l'audit de sécurité est un cas d'usage pertinent pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la réponse aux exigences relative à cet audit conditionne la validation des étapes de conception et la mise en service de l'infrastructure : c'est donc une étape incontournable dans le projet de conception. Ensuite, pour son apport à notre proposition de MCD. Ce cas d'usage concerne une grande partie des métiers de la conception d'infrastructures linéaires routière et les contrôles de conformité aux exigences et de cohérence de la conception sont fréquents. De plus, ils varient selon l'avancement de la conception. Plusieurs points de contrôle sont programmés entre le début de l'avant projet et après les premiers mois de la mise en service, ce qui soulève clairement la question des LOD et des LOI (pour rappel, nous ne considérons ici que les phases d'AVP et de PRO). Cela signifie que plusieurs univers du discours et niveaux d'abstraction coexistent dans ce cas d'usage. Leur contenu varie également selon la phase. Par conséquent, de nombreux objets et interactions sont concernés pour répondre à de multiples exigences. Ensuite, ce cas pratique est lié à de nombreuses exigences avec des réponses techniques souvent en contradiction. Par ailleurs, le contrôle du respect de certaines exigences ne peut se faire que sur la base d'une appréciation qualitative. Une expertise forte est nécessaire pour la justification de la réponse à certaines exigences, notamment concernant la visibilité et la sécurité où certains éléments prescrits dans un cadre réglementaire deviennent contre sécuritaires lorsque l'on considère l'ensemble des objets présents dans cette zone (ouvrages d'art, équipements, etc.). Les processus de suivi des décisions apparaissent comme particulièrement importants dans ce cas, ce qui se traduit par des liens forts entre le *système à faire* et le *système pour faire*. Enfin, ce cas d'usage se base sur le projet de la Rcade L2 à Marseille. Comme évoqué dans la section 1.1.2,

ce projet intègre des ouvrages construits il y a plusieurs dizaines d'années soumis à d'anciennes normes et il est très contraint par son contexte urbain dense : la complexité de la gestion des interactions entre exigences en fait un cas idéal pour notre expérimentation puisqu'il permet le traitement de nombreux cas particuliers sur un même projet.

La préparation à l'audit de sécurité consiste à répondre à un certain nombre de points particuliers encadrés par des réglementations spécifiques. Nous citons quelques sujets : sécurité des usagers, éblouissement et éclairage, sécurité incendie dans les tunnels, visibilité dans les descentes, rampes et virages, aquaplaning, sécurité des usager en panne, etc. Cette préparation fait l'objet de contrôles externes (effectués par un expert extérieure au bureau d'étude de conception mais pas nécessairement externe à l'entreprise) qui seront ensuite évalués par les services de l'état (contrôle extérieur). Le travail de l'expert en charge de cette préparation (nous n'évoquons ici que le travail de contrôle externe) consiste à identifier au plus tôt pendant la conception les point bloquants qui peuvent devenir plus complexes à résoudre si la conception est trop avancée. Un problème de visibilité dans un virage avec une voie en passage supérieur est plus simple à résoudre en modifiant l'implantation de l'ouvrage d'art ou ses longueurs de travées qu'en modifiant tout le tracé de l'infrastructure linéaire pour correspondre à l'implantation de l'ouvrage d'art si les travaux de ce dernier sont entamés.

Pendant le projet de conception, cette préparation de l'audit de sécurité à fait l'objet d'une instruction de projet spécifique qui fait le lien entre le plan de management de projet et le BEP. Cette dernière traite spécifiquement de la « Réalisation de l'audit de sécurité via la maquette numérique ». Elle décrit :

- les responsables des données et de validation ;
- les objets concernés ;
- les consignes de modélisation de ces objets dans la MN ;
- la méthodologie d'exploitation de la MN pour l'audit de sécurité (travellings et points de vue).

Ces éléments alimentent la première partie de notre analyse.

7.4.1 Cas d'utilisation

Nous pouvons maintenant définir, dans ce contexte de la préparation à l'audit de sécurité, les sollicitation du *système à faire* avec la définition des cas d'utilisation. Contrairement au cas des études acoustiques, les sortants de chaque BE ne nous intéressent pas individuellement. Il ne sont utilisés dans ce cas d'usage que dans l'espace de coordination, pour la synthèse (Figure 2.2). Ainsi, les cas d'utilisation concernent les « modèle métier » (voir Figure 7.15) et surtout les modèles de synthèse (voir Figure 7.16).

Ces cas d'utilisation ne considèrent que les données liées à la préparation de l'audit de sécurité. La Figure 7.16 indique que plusieurs acteurs valident les MN de synthèse : implicitement, cela indique que dans les processus de conception, il existe plusieurs niveaux de validation et que ces validations ne concernent pas toujours les mêmes exigences. Le traitement de ce cas d'usage s'inscrit dans la dynamique de nombreuses activités du projet de conception et donc de plusieurs sous-projets. Mais la préparation de l'audit de sécurité n'est pas un projet en soi. Elle ne concernent pas l'ensemble du projet mais une forte majorité, dont les principaux sont les *Objet_I plateforme (géométrie), dispositif de retenue, signalisation, équipements divers*, ainsi que l'ensemble des objets proches de la zone de circulation (questions de gabarit, de visibilité, etc. ; cette liste varie avec le type de projet ainsi que selon les choix de réalisation). Le *système à faire* lié à ces études est constitué d'une partie importante du *système à faire* du projet de conception (voir Figure 7.17). Il n'est pour le moment pas possible d'isoler un système spécifique à étudier comme dans le cas de l'étude acoustique. Par contre, nous pouvons définir l'environnement de ce *système à faire* (voir la Figure 7.18). Les éléments en orange de cette figure sont ceux que nous considérons pour le cas d'usage décrit ci-dessous, uniquement dans

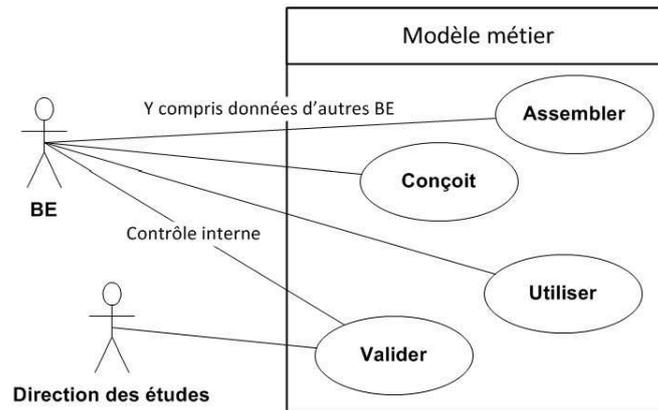


FIG. 7.15 – Cas d'utilisation pour les modèle métier des différents BE dont les données sont attendues pour la préparation à l'audit de sécurité.

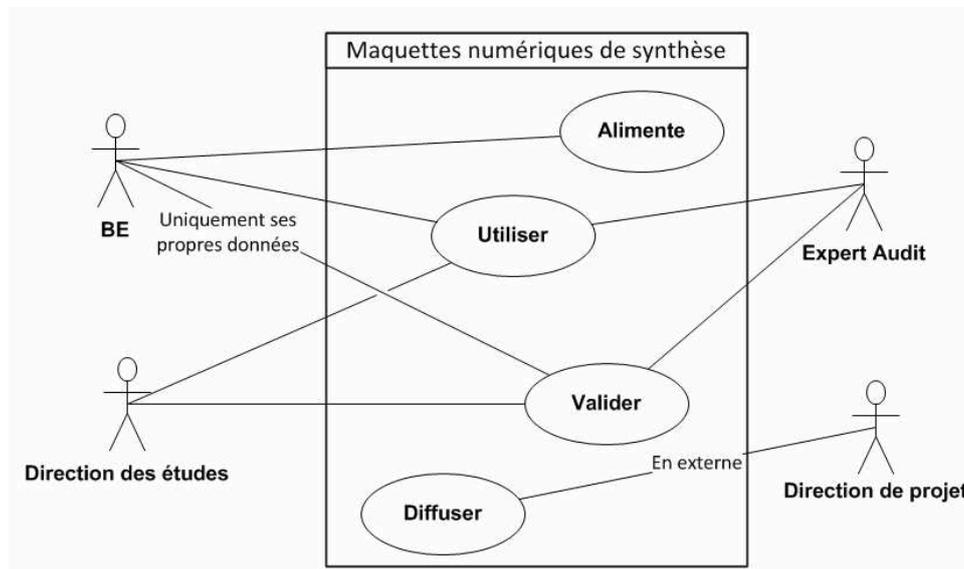


FIG. 7.16 – Cas d'utilisation pour une maquette numérique de synthèse (actions relatives uniquement aux activités de préparation de l'audit de sécurité).

leurs composantes concernant le *système à faire*, c'est-à-dire que nous ciblons les exigences de produit et non de processus.

7.4.2 Contexte réglementaire et contractuel

Retenons ici les principaux documents de réglementation et exigences contractuelles à respecter qui concernent directement l'audit de sécurité.

- Ce projet s'inscrivant dans un contexte très urbanisé, la catégorie A80 de l'ICTAVRU - Édition 2009 est le référentiel technique retenu comme précisé dans le PFD (Programme Fonctionnel Détaillé).
- La vitesse maximale autorisée de 90 km/h est celle retenue sur l'ensemble de la section, à l'exception de l'extrémité de la section Est de la L2 à son raccordement avec l'autoroute A50 où la vitesse est réduite à 70 km/h.
- Le référentiel est complété par le « Guide d'application conception des accès sur voies rapides urbaines de type A » (Édition 2003).

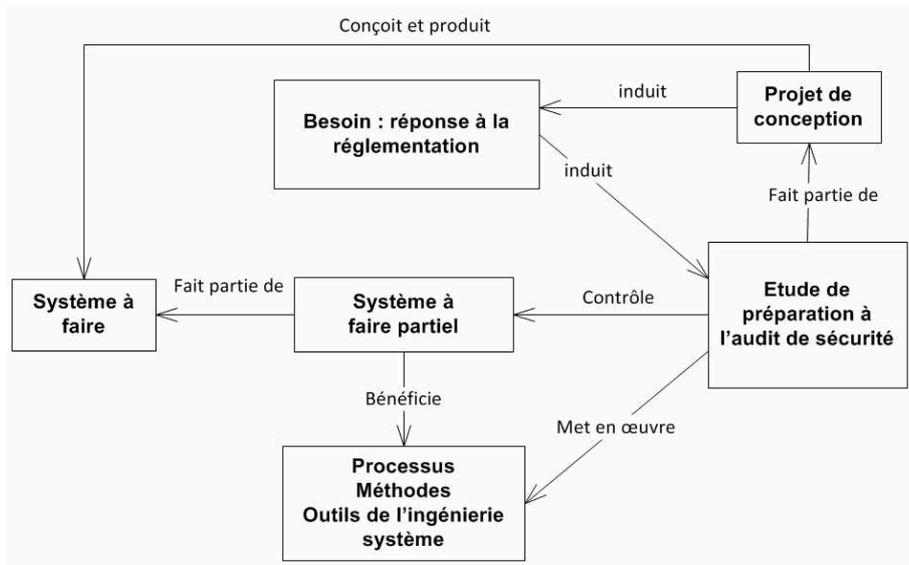


FIG. 7.17 – Relation entre les études de préparation à l'audit de sécurité (système pour faire), le système à faire et l'ingénierie système.

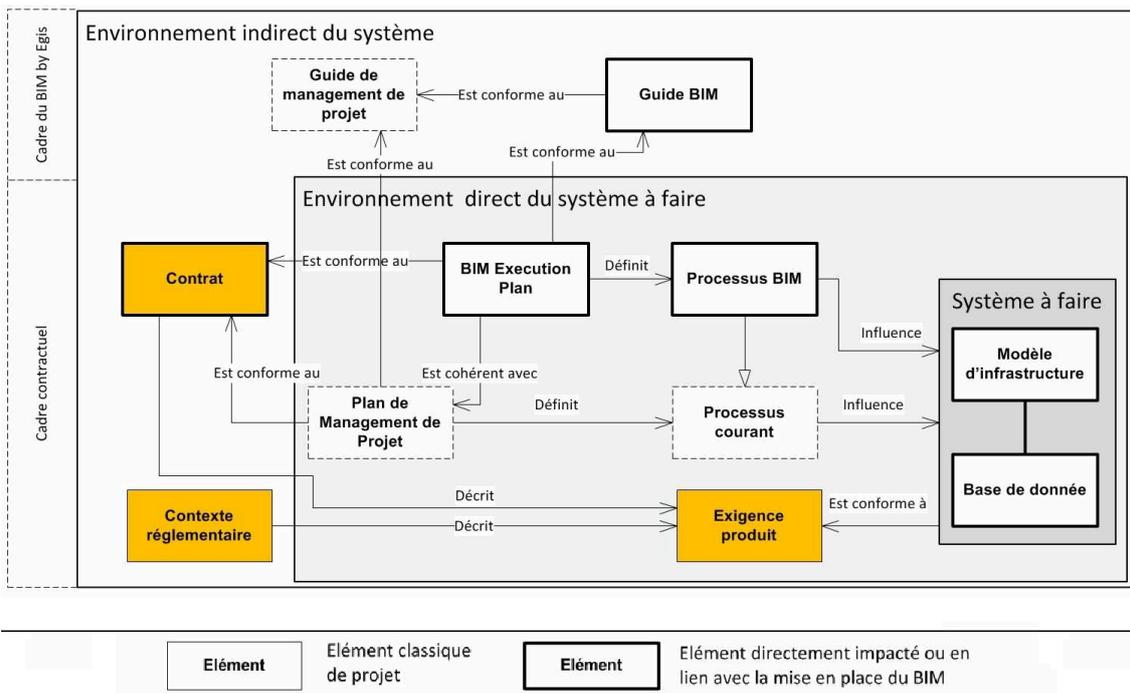


FIG. 7.18 – Les cadres en orange sont ceux considérés pour notre étude et principalement pour la définition des exigences.

- Le Programme Fonctionnel Détaillé (version du 26 septembre 2012) est également une pièce importante.
- Le Guide pour la conception générale du génie civil des tranchées couvertes - Edition 2002 - SETRA et le dossier Pilote des tunnels - Edition décembre 1990 - CETU ont été utilisés comme référentiels.

Tous ces documents nous permettent d'identifier les univers du discours des acteurs intervenant lors de cette étude. Toutefois, nous ne traiterons pas ici l'ensemble des exigences et de ces univers.

Il serait également possible de compléter ces univers du discours par l'utilisation d'ontologies métier, construites par exemple de manière automatique à partir de ces textes. Nous reviendrons sur ce point dans les perspectives. Nous allons sélectionner certaines exigences qui vont limiter le nombre d'univers à considérer et à modéliser. Les exigences sélectionnées l'ont été pour leur transversalité entre métiers.

Nous allons présenter deux approches sur ce même cas d'usage, étant donné son impact sur une proportion importante du *système à faire*. Ce cas d'usage semble être le plus complexe et le plus complet, notamment du fait des appréciations qualitative de la réponse aux exigences, évoqué ci-dessus, ainsi qu'une grande mixité des contextes sollicité (nombreux systèmes, appartenance à des Entités ou ouvrages fonctionnels variés et partiellement superposés). Nous présentons donc :

1. le traitement de l'Objet_1 *dispositif de retenue* dans le cadre de la réponse à plusieurs exigences : l'intérêt est de montrer les différentes représentations sollicités selon l'exigence traitée ;
2. l'identification de l'ensemble des objets relatifs aux nombreuses exigences de la préparation à l'audit de sécurité : l'intérêt est de montrer les différents Systèmes et Entités fonctionnelles pour l'allocation des exigences.

7.4.3 Exigences liées à la sécurité : la question des dispositifs de retenue

Axe 1 de la modélisation : définition des univers du discours, objectifs et exigences

Nous nous intéressons ici à certaines exigences de sécurité qui concernent les dispositifs de retenue, éléments indispensables pour la sécurité des usagers. Ces dispositifs sont généralement de type béton ou métal. Ils peuvent être présents à chaque bord de plateforme (en terre-plein central ou en bord droit de chaussée par rapport au sens de circulation). Plusieurs exigences concernent ces objets : certaines portent directement sur les performances du dispositifs et d'autres visent plutôt à garantir une continuité dans la protection des usagers et une limitation des obstacles saillants. Voici les exigences que nous considérons ici, extraites des grilles contrôle réglementaires (les exigences sont ici sous forme de question, l'exigence réelle étant de répondre à ces questions ; la numérotation de ces exigences est celle du tableau des contrôle : elle est conservée pour faciliter la lecture de cette partie). (Les exigences citées ci-dessous ne sont pas les seules à concerner les dispositifs de retenues.)

Exigence SC - 9 : A-t-on recherché une géométrie permettant de limiter au maximum le nombre d'obstacles d'une part et l'agressivité des dispositifs de retenue indispensables d'autre part ? (*Exigence traitée pendant les phases AVP et PRO.*)

Exigence SC - 10 : La largeur de la bande médiane est-elle compatible avec le type de dispositifs de retenue choisis ? (*Exigence traitée pendant les phases AVP et PRO.*)

Exigence SC - 20 : Les obstacles latéraux existants ou futurs sont-ils identifiés et recensés de façon exhaustive ? A-t-on tout fait pour les éviter ? (*Exigence traitée pendant les phases AVP et PRO.*)

Exigence SC - 21 : Les emprises sont-elles suffisamment dimensionnées pour permettre l'isolement correct des obstacles et équipements ? (*Exigence traitée pendant les phases AVP et PRO.*)

Les objets évoqués dans ces exigences ainsi que les éléments implicites (qui appellent l'expérience d'experts) définissent les termes des univers du discours de cette modélisation. Nous pouvons citer principalement les objets plateforme, dispositif de retenue, obstacle (poteaux, piles, murs, équipements, etc.), terre-plein central, interrupteur de terre-plein central, emprise de l'infrastructure, type de dispositifs de retenue (béton ou métal), talus. Il est difficile d'être exhaustif dans l'absolu, sans connaître les particularités du projet.

Axe 2 de la modélisation : simplification et niveaux d'abstraction

Une majorité des éléments des univers du discours sont simplifiables en Objet_I. Pour chaque exigence fonctionnelle (exigences portant sur un ensemble de classes d'Objet_I), nous donnons dans les tableaux ci-dessous les LOXi de chaque Objets_I. (Les Objet_I cités dans ces tableaux sont définis dans le glossaire en page 231. Nous y apportons également quelques précisions sur les relations entre chaque Objet_I et les exigences dans le cadre du projet de Rocade L2 Marseille.)

Exigence SC - 9 : Tableau 7.2

Exigence SC - 10 : Tableau 7.3

Exigence SC - 20 : Tableau 7.4

Exigence SC - 21 : Tableau 7.5

Quelques commentaires sont nécessaire à la bonne compréhension des informations rassemblées dans ces tableaux. Tout d'abord, la signalisation horizontale sur les plateformes doit être modélisée pour la bonne compréhension de la scène. Elle peut être modélisée de manière générique si sa conception n'est pas assez avancée notamment en AVP. Il ne s'agit donc pas encore d'objets à part entière mais plutôt d'une texture de l'Objet_I *plateforme*, basée sur les premières hypothèses de dimensionnement de la chaussée. Ensuite, selon l'avancement des études, les dispositifs de retenue peuvent être soit seulement implantés spatialement, soit implantés et dimensionnés : pour cette raison, la dimensionnalité de cet objet est variable (excepté pour l'exigence SC-10 puisqu'il s'agit d'un contrôle d'encombrement : le volume de l'objet est indispensable). Concernant les panneaux de signalisation verticale, des éléments complémentaires sont apportés ci-dessous. Enfin, pour la définition des textures, elles permettent généralement de mieux comprendre la scène et d'identifier les différents objets. Certaines textures sont toutefois fonction des attributs, de la précision des données ou du statut de validation de l'Objet_I (sujets non traités ici). Le gabarit de l'Objet_I n'est pas évoqué dans cette figure car il n'est pas utile ici. Mais certains sujets traités pour la préparation à l'audit de sécurité ont permis d'identifier plusieurs types de gabarits : le gabarit de disposition constructives, le gabarit d'emprise et le gabarit de fonctionnement (par exemple,

TAB. 7.2 – Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 9 suite à simplification des univers du discours. Contrôle en Avant Projet (AVP).

Exigence SC - 9				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
plateforme (section courante et sorties)	/		idem conception	noir (compréhension de la scène) + signalisation horizontale en blanc
dispositif de retenue	matériau (béton, métal)	 ou 	lignes de conception (implantation)	pour différencier le matériau
porteur de signalisation directionnelle	précision d'implantation longitudinale	  ou 	idem conception	pour compréhension de la scène et identification rapide de l'objet (mise en valeur visuelle)
pile (d'ouvrage d'art) (pont ou tunnel)	/		volume simple	béton (compréhension de la scène)

TAB. 7.3 – Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 10 suite à simplification des univers du discours.

Exigence SC - 10				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
plateforme	/		idem conception	noir (compréhension de la scène) + signalisation horizontale en blanc
dispositif de retenue	matériau (béton, métal)		lignes de conception (implantation)	pour comprendre la scène et différencier le matériau

TAB. 7.4 – Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 20 suite à simplification des univers du discours.

Exigence SC - 20				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
plateforme	/		idem conception	noir (compréhension de la scène) + signalisation horizontale en blanc
dispositif de retenue	matériau (béton, métal)	 ou 	lignes de conception (implantation)	pour comprendre la scène et différencier le matériau
porteur de signalisation directionnelle	précision d'implantation longitudinale	  ou 	idem conception	pour compréhension de la scène et identification rapide de l'objet (mise en valeur visuelle)
pile (d'ouvrage d'art) (pont ou tunnel)	gabarit de fonctionnement si glissière métal		volume simple	béton (compréhension de la scène)

TAB. 7.5 – Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 21 suite à simplification des univers du discours.

Exigence SC - 21				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
plateforme	/		idem conception	noir (compréhension de la scène) + signalisation horizontale en blanc
dispositif de retenue	matériau (béton, métal)	 ou 	lignes de conception (implantation)	pour différencier le matériau
porteur de signalisation directionnelle	précision d'implantation longitudinale	  ou 	idem conception	pour compréhension de la scène et identification rapide de l'objet (mise en valeur visuelle)
pile (d'ouvrage d'art) (pont ou tunnel)	/		volume simple	béton (compréhension de la scène)

lorsque le dispositif de retenue est une glissière métal, l'énergie cinétique du véhicule à stopper est absorbée en partie par déformation de la glissière : un espace libre est donc nécessaire derrière cette glissière, gabarit de fonctionnement). Cet élément est à ajouter dans notre proposition de MCD pour *Objet_I* (changement de cardinalité dans la relation *Objet_I* - *gabarit* qui passe de 0, 1 à 0..*).

Un dispositif de retenue fait partie des équipements de l'infrastructure mais il appartient au Système *Sécurité des usagers*. Les équipements sont une catégorie d'objet. Le Système *Sécurité des usagers* rassemble des *Objet_I* de plusieurs catégories pour un contrôle de cohérence et de continuité de la protection des usagers. Le traitement du cas d'usage sur l'assainissement (non détaillé ici) a montré qu'un dispositif de retenue en béton pouvait faire partie du réseau d'assainissement longitudinal de plateforme sous certaines conditions, notamment pour répondre à la réglementation Loi sur l'eau (voir Figure 7.19). Ce dispositif de retenue appartient à la section courante (entité fonctionnelle) mais il pourrait appartenir au rétablissement. Dans le cas de l'*Objet_I*, l'appartenance est unique (une seule entité fonctionnelle). Par contre, la continuité sécuritaire du Système des équipements le rend transversal à plusieurs Entités fonctionnelles, en l'occurrence ce Système Sécurité des usagers appartient aux Entités fonctionnelles Section courante et Rétablissement. Les exigences évoquées ci-dessus sont ensuite allouées aux objets qui les concernent, conformément à notre proposition en fin de Chapitre 6. Ainsi, la continuité entre la structuration des exigences et la structuration du système à faire est conservée pour cet *Objet_I*. Cette cohérence reste à confirmer sur d'autres *Objet_I*.

7.4.4 Éléments sur d'autres objets concernant l'audit de sécurité

Le travail réalisé dans le cadre de l'audit de sécurité ne peut être détaillé de la même manière que pour les dispositifs de sécurité (exemple traité en Figure 7.19). La considération d'un seul *Objet_I* et de seulement quatre exigences sur les 124 de la grille d'évaluation, exigences qui ne viennent que d'une

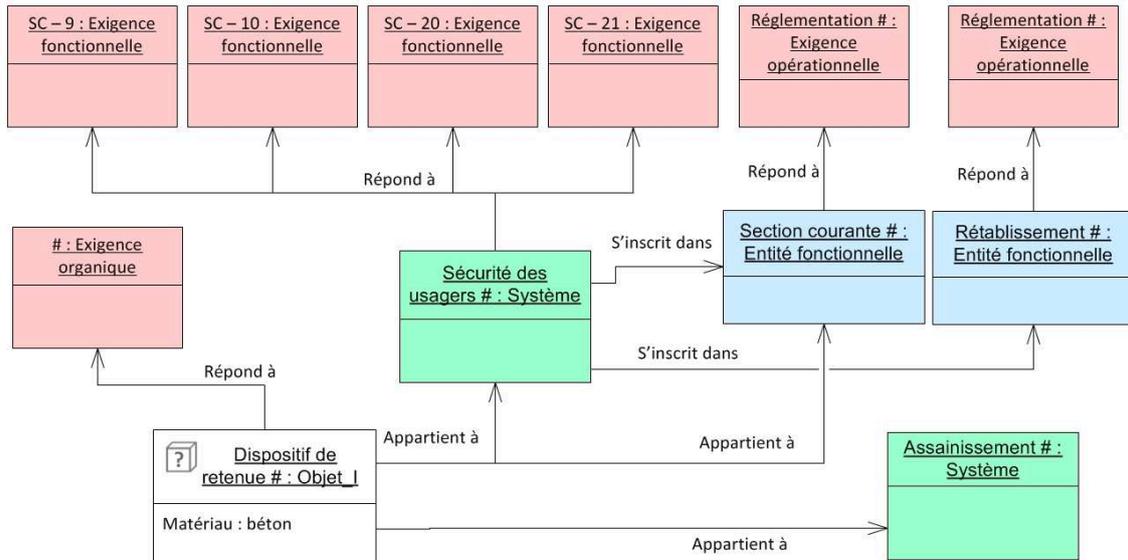


FIG. 7.19 – MCD objet instancié pour l'Objet_I dispositif de retenue dans le cadre de la réponse aux quatre exigences citées ci-dessus. Les couleurs ne servent qu'à identifier les différentes classes. (Cette figure est non exhaustive du point de vue des exigences pour ne pas devenir illisible.)

des réglementations en vigueur et qui ne prends pas en compte des exigences transversales à d'autres métiers ou les exigences de constructibilité par exemple, montre l'ampleur du travail à détailler. Nous avons dans notre travail sélectionné les points les plus complexes à traiter en particulier afin d'évaluer notre proposition de MCD sur un maximum de cas. Nous tenons donc à en rapporter quelques éléments clés qui participent à l'analyse de notre proposition de MCD.

Cas des portiques de signalisation verticale

Les portiques de signalisation directionnelle verticale contiennent les indications nécessaires aux usagers pour se placer sur les bonnes voies grâce aux mentions de ces panneaux. Ces objets se retrouvent à la convergence de nombreuses exigences et appartiennent à plusieurs systèmes. Ces panneaux peuvent être fixés sur des portiques, potences ou directement en applique sur une structure verticale. Suite à notre analyse de la préparation à l'audit de sécurité, nous listons ci-dessous cinq thématiques pour lesquelles les panneaux de signalisation font partie des univers du discours.

1. La sécurité : en phase AVP, les contrôles portent sur la vérification de la protection portiques. A cette phase, l'implantation peut varier linéairement de plusieurs dizaines de mètres. En phase PRO, il convient de modéliser les portiques pour contrôler qu'effectivement, leur implantation est protégée par un dispositif de retenue.
2. La vérification des gabarits : seule le panneau de mentions est nécessaire dans un premier temps, sans son support d'accroche (vérification du gabarit vertical). Puis plus tard dans le projet de conception, le montant est nécessaire pour contrôler cette fois le gabarit réglementaire de dégagement horizontal.
3. La visibilité : vérification que le conducteur à bien une visibilité simultanée en section courante sur deux éléments indispensables à la matérialisation d'une sortie : panneau (type D31) et balise (type J14) (voir Figure 7.20).
4. La cohérence de la signalisation directionnelle : pour ce contrôle, seuls les panneaux avec les mentions sont nécessaires, sans le dimensionnement des portiques ou des fondations.

5. La coordination 3D souterraine (différente de la coordination 3D géométrique qui s'intéresse à la cohérence du tracé dans l'espace pour l'utilisateur) : elle doit permettre la détection de clashes avec les réseaux enterrés. Il s'agit d'une exigence de coordination entre métiers ; selon les cas, il peut être nécessaire de procéder à ce type de vérification dès les phases amont et pas uniquement en fin de phase PRO (cas des zones avec de nombreux réseaux dans un espace contraint comme c'est le cas des environnements urbains). Cela ne nécessite pas le dimensionnement complet du portique mais uniquement son implantation approximative pour identifier si à terme, ce poteau peut poser problème. Les points de vigilance pour la suite de la conception sont ainsi identifiés en amont, ce qui est rappelons-le un des objectifs de la préparation à l'audit de sécurité.



FIG. 7.20 – Exemple de non respect de la visibilité simultanée à distance réglementaire, fonction de la vitesse de circulation, sur le panneau de sortie (sortie 34, panneau de type D31) et sur la balise de divergent (balise verte, type J14, entourée en rouge en bas à droite de l'image de droite : elle n'est pas visible sur l'image de gauche à la distance réglementaire). Extrait de la MN d'avant projet. On remarquera l'absence des porteurs de ces panneaux dans cette modélisation.

La Figure 7.21 montre la décomposition possible d'un panneau de signalisation verticale. Selon les exigences à traiter et donc le niveau d'abstraction, certains de ces trois éléments constitutifs ne sont pas à modéliser. Nous allons démontrer cela dans les Tableaux 7.6, 7.7, 7.8 et 7.9 ci-dessous. D'autres LOA pourraient définir le panneau de signalisation vertical comme un seul objet ou comme plus de trois objets.

Le constat est le suivant : pour la résolution de chaque exigence, les besoins dans les trois concepts de LOA, LOD et LOI varient et ce, de manière non corrélée. Cette plus grande précision dans la définition des besoins permet d'identifier les analyses pouvant être effectuées en fonction de la disponibilité des informations pour chaque objet (de l'avancée de la conception donc). On note par exemple que la réponse à l'exigence de gabarit pourrait être étudiée avant celle de visibilité puisque bien qu'ayant le même LOA, les besoins en informations attributaires (LOI) diffèrent.

TAB. 7.6 – Tableau des LOXi pour les exigences SC - 9 et SC - 20 citées ci-dessus suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_1 Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_1 concernés par cette exigence.)

Exigence SC - 9 et SC - 20				
LOA	LOI	LOD		
Objet_1	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
Panneau de mentions	/		idem conception	Mentions réelles ou non ; permet surtout de savoir qu'un portique est présent
porteur de signalisation directionnelle	précision d'implantation longitudinale	ou	idem conception	pour compréhension de la scène et identification rapide de l'objet (mise en valeur visuelle)

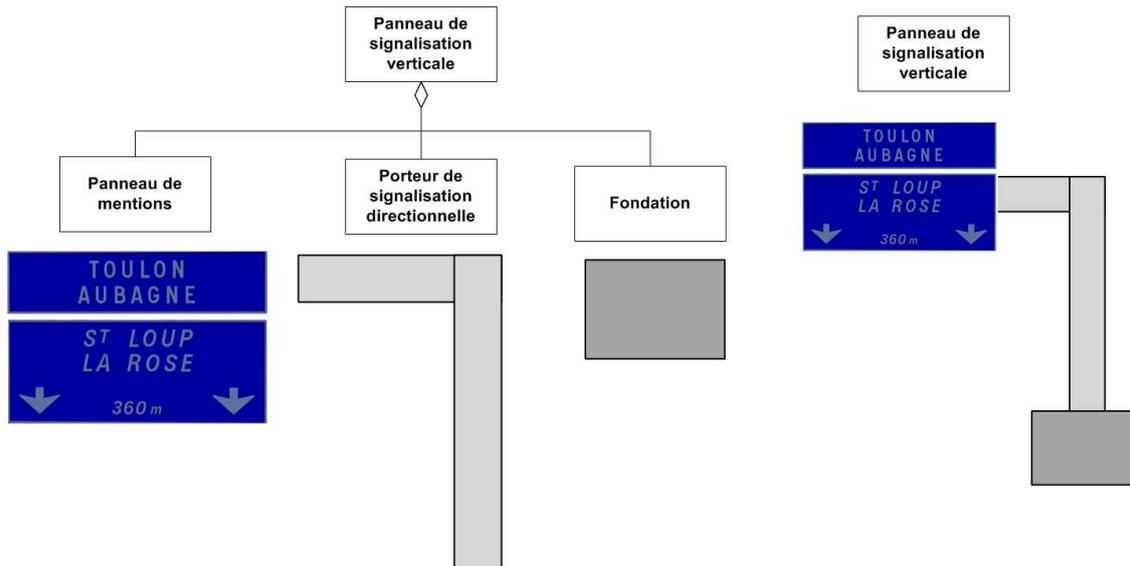


FIG. 7.21 – Décomposition symbolique d'un Panneau de signalisation verticale. Cette décomposition est spécifique au LOA défini pour répondre aux exigences évoquées ci-dessus. Le Panneau de signalisation verticale seul correspond à un autre LOA.

TAB. 7.7 – Tableau des LOXi pour l'exigence de vérification du gabarit de passage des véhicules suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)

Exigence de vérification du gabarit				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
Panneau de mentions	/	 ou 	idem conception	pour compréhension de la scène
porteur de signalisation directionnelle	/		idem conception	pour compréhension de la scène

TAB. 7.8 – Tableau des LOXi pour l'exigence de visibilité entre panneau D32 et balise J14 (voir Figure 7.20) suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)

Exigence de visibilité				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
Panneau de mentions	Type de panneau, réflexivité, mentions	 ou 	idem conception	pour compréhension de la scène + mentions de la conception

Cas des contrôles de gabarits

Nous ne parlons pas ici des contrôles de gabarit en plan pour le passage des poids-lourds ou convois exceptionnels par exemple qui se font dans les outils métier. Nous évoquons ici plusieurs gabarits.

Le gabarit vertical est étudié avec une modélisation 3D de coordination. Selon la phase, toutes les Entités fonctionnelles du projet ne sont pas concernées par cette étude. En AVP, seules certaines zones sont évaluées. En PRO, l'ensemble du projet est évalué mais les exigences ne sont pas les mêmes selon la zone de circulation : la hauteur réglementaire du gabarit à conserver au minimum varie. Trois types de zone ou ouvrages peuvent être identifiées :

- en section courante d'autoroute classique : 5,50 m (Entités fonctionnelles *section courante*, *réta-*

TAB. 7.9 – Tableau des LOXi pour l'exigence de coordination 3D suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)

Exigence de coordination 3D				
LOA	LOI	LOD		
Objet_I	attributs	dimensionnalité	complexité géométrique	texture
Fondation	précision d'implantation longitudinale		idem conception	pour compréhension de la scène
Panneau de mentions	précision d'implantation longitudinale	 ou 	idem conception	pour compréhension de la scène
porteur de signalisation directionnelle	précision d'implantation longitudinale		idem conception	pour compréhension de la scène

blissement, échangeur, diffuseur);

- en section proche avant et après tranchée couverte : 5,00 m (Entités fonctionnelles *franchissement* de type tunnel);
- en tranchée couverte : 4,70 m (Entités fonctionnelles *franchissement* de type tunnel).

Cette différenciation prouve bien la nécessité de définir des Entités fonctionnelles pour répondre chacune à leur exigence spécifique de gabarit. Notons que les gabarits ou dégagements horizontaux font également l'objet d'une analyse de coordination 3D.

Les dispositifs de retenue (béton ou métal) assurent la protection des usagers de la route mais également la protection des équipements ou des ouvrages d'art de l'infrastructure. La réglementation décrit une « zone d'isolement » dans laquelle sont positionnés les objets à protéger (voir Figure 7.22). Les objets hors de cette zone ne sont pas protégés. Ainsi, pour contrôler l'exigence de protéger tous les objets qui le nécessite, il faut :

- un objet « zone d'isolement » qui est le *gabarit* de la protection en béton,
- de l'information sémantique pour identifier les Objet_I ou Système qui nécessitent d'être protégés et donc qui doivent être inclus dans ce *gabarit*².

Cette « zone d'isolement » est valide si l'Objet_I Dispositif de retenue répond aux exigences produit de la réglementation nationale (Norme Française, NF). Ce seul contrôle de *gabarit* nécessite donc la vérification préalable d'autres exigences.

Un dernier *gabarits* peut être évoqué : l'espace nécessaire à la réalisation des ouvrages, dit *gabarit des dispositions constructives*. Bien que ce contrôle concerne la phase d'exécution des travaux, ces exigences sont contrôlées pendant la phase de PRO et d'EXE .

7.4.5 Analyse et conclusion de ce cas d'usage

Limites dues à l'avancement de la conception

La préparation à l'audit de sécurité se base sur les éléments techniques disponibles aux différentes étapes de cette préparation. Par conséquent, certaines réponses aux exigences ne sont pas apportées par des solutions techniques mais par des commentaires faisant état du manque (normal) d'informations dû à l'avancement de la conception. Voici quelques exemples d'élément ne pouvant être traités en phase AVP (Avant Projet) :

- la maîtrise des contraintes de gabarit en phases d'entretien et d'exploitation ;
- le détail des éléments de raccordement entre dispositifs de retenue ;
- la protections des supports de panneaux directionnels en l'absence de plans précis du positionnement au *cm* (ne sont donc considérés que les panneaux sans les supports) ;
- l'éclairage ;

2. Il s'agit d'une détection de clash qui n'est pas une interaction de volume ou de surface mais une inclusion.

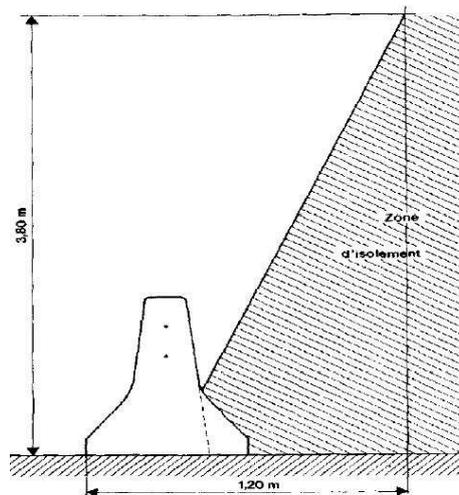


FIG. 7.22 – Illustration de la « zone d'isolement » derrière les dispositifs de retenue béton, d'après [SETRA, 1988].

- l'implantation des accès de services et de secours ;
- la géométrie des échangeurs en cours d'étude, excepté les raccordements à la section courante.

Pour une même exigence au travers des phases de conception, les univers du discours peuvent croître. Ainsi, les LOD (Level Of Detail) et LOI (Level Of Information) varient. Par contre, les LOA (Level Of Abstraction) restent majoritairement constants : même si l'information (détail sémantique ou géométrique) n'est pas disponible, le regard porté sur le projet par rapport à la résolution d'une exigence reste identique.

Structuration des Objets_I selon les exigences catégorisées et les trois vues de l'ingénierie des exigences

Nous ne traitons pas aussi précisément tous les objets liés à la préparation de l'audit de sécurité. Par contre, suite à notre travail d'expérimentation et d'analyses sur les besoins en modélisation dans ce cadre, nous avons identifié quatre catégories d'exigences fonctionnelles³ ainsi que les Objets_I qui s'y rapportent (Voir Figure J.1 en Annexe J pour les Objets_I liés) :

1. Lisibilité : compréhension du tracé en dehors de tout élément de signalisation (la lisibilité est nécessaire *a minima* si la visibilité n'est pas satisfaisante).
2. Visibilité : compréhension du tracé et des échanges avec les autres infrastructures routières (existantes ou projet).
3. Sécurité : concerne de nombreuses réglementations : sécurité des usagers (vitesse, obstacles, gestion du trafic), sécurité en tunnels, géométrie de la plateforme, etc. Par conséquent, une majorité des Objets_I proches spatialement ou fonctionnellement de la plateforme de roulement sont liées à la sécurité.
4. Gabarit : concerne l'évaluation des gabarits réglementaires verticaux et horizontaux ainsi que les gabarits de fonctionnement et d'entretien des équipements sous circulation. Ne concerne pas la coordination 3D qui dépasse le cadre de ce cas d'usage.

L'identification de ces catégories correspond en fait à la définition de cinq univers du discours. Certains éléments se recoupent mais l'expert qui prépare l'audit de sécurité traite ces sujets un par un. Ensuite,

3. Ces catégories sont les principales mais ne sont pas les seules à considérer dans le cadre de la préparation à l'audit de sécurité.

plusieurs LOA sont possible pour le traitement de chaque catégorie d'exigences fonctionnelles. Le travail présenté ci-dessus a permis de décrire partiellement ces univers du discours ainsi que les LOA pour ces catégories d'exigences (un extrait de ce travail est présenté dans les tableaux ci-dessus). Par exemple pour la sécurité, selon l'exigence, le projet est modélisé de plusieurs manières. La question des obstacles dangereux pour les usagers nécessite une modélisation différente du contrôle des marquage au sol ou de la vérification de la réglementation incendie en tunnel⁴. Nous avons au départ répertorié les *Objet_I* de ce cas d'usage dans cinq catégories. Tous ces *Objets_I* n'appartiennent qu'à une seule catégorie à la fois (sauf la niche de tunnel pour la sécurité incendie : cela vient du fait qu'il n'a pas été précisé si il s'agissait de la niche physique (génie civil) ou des équipements et signalisation de la niche dans le tunnel, d'où l'importance de bien définir les univers du discours ; selon la catégorie d'exigences, l'expert a besoin respectivement de la modélisation du génie civil pour la sécurité en circulation et seulement de la matérialisation visuelle de la niche pour le contrôle du respect de la réglementation incendie en tunnel (voire Figure J.2 en Annexe J ; le recours aux ontologies peut permettre de résoudre ces problèmes sémantiques). Nous avons ensuite alimenté les deux vues proposées par l'ingénierie des exigences dans le domaine de la solution avec ces éléments (voir Figures J.3 et J.4 en Annexe J).

Cette approche mène à une structuration des objets et des systèmes différent des premières structurations proposées avant ce travail de thèse. Nous n'avons plus une seule et unique mais bien plusieurs structurations possibles, du fait de la relation entre les *Objet_I*, les différents LOA et les exigences. Par exemple, la continuité des dispositifs de retenue entre plusieurs entités fonctionnelles (de section courante vers un ouvrage d'art par exemple) n'est pas contrôlée sur les dispositifs de retenue eux même mais bien sur l'ensemble du *Système dispositif de retenue*. Retenons tout de même que le traitement des objets Entité fonctionnelle reste complexe : ces ouvrages fondamentaux dans la constitution d'une infrastructure pour son fonctionnement et également pour la gestion du projet intègrent toujours une composante organique et une composante fonctionnelle contrairement à la structuration des exigences en trois vues distinctes.

4. Aujourd'hui, les outils de modélisation ne permettent pas réellement de gérer plusieurs abstractions. Par conséquent, il n'est pas possible d'illustrer ces propos avec des extraits de maquettes numériques.

Analyse de l'application du MCD

Ce chapitre constitue une synthèse générale suite à l'exploitation de notre proposition sur les cas d'usage. Il est complémentaire à l'analyse proposée à la fin de chaque cas d'usage. Il n'est pas possible selon nous de quantifier précisément les avantages apportées par cette proposition par rapport à des processus classiques de conception. C'est d'ailleurs ce problème qui, en partie, freine la mise en place de processus BIM. Nous analysons ici les apports de notre proposition ainsi que les points bloquants restant à travailler pour améliorer cette proposition. Nous verrons comment notre proposition répond à notre préoccupation principale de produire un *système à faire* de qualité (cohérent, à jour, validé par coordination de disciplines, etc.) et de définir les outils et méthodes pour décrire le contenu des BIM use dans l'optique de répondre aux besoins du projet d'infrastructure. La définition de ce contenu passe par une structuration de l'information et des processus dans des BIM uses à l'aide des LOXi que nous proposons. Nous ne décrivons dans ce mémoire que deux cas d'usage pour expérimenter notre proposition. Mais comme précisé précédemment, d'autres cas d'usage dans le cadre du projet MINnD ou en interne chez Egis dans le cadre du projet *BIM by Egis* ont également alimenté la validation de notre proposition. Ces exemples ont permis de traiter des cas complexes et représentatifs en impliquant une majorité des objets et des points de vue d'un projet d'infrastructure. Ainsi, bien que l'analyse ci-dessous ne puisse être généralisée sur tout un projet à partir de ces exemples, une partie importante de l'information de conception a été considérée.

8.1 Analyse de la réponse du MCD face aux sollicitations des cas d'usage

8.1.1 MCD proposé pour les Objet_I

Même en ne considérant qu'une exigence à la fois, nous avons montré que chaque Objet_I peut nécessiter d'être représenté par plusieurs géométries (pictogramme PERCEPTORY). Si l'on ajoute à cela les besoins de modélisation pour les livrables (vues en plan, coupe, profils en travers, vues de détail, etc.), la dimensionnalité et la représentation de chaque objet devient un ensemble de configuration assez vaste. Dans le MCD d'Objet_I nous représentons cela par un pictogramme en forme de tableau qui remplace le pictogramme de PERCEPTORY. Ce tableau contient ensuite des pictogrammes de PERCEPTORY pour chaque niveau d'abstraction, et donc indirectement selon l'exigence à traiter. En effet, pour une exigence, au moins un LOA est défini (voir Figure 8.1 et Tableau 8.1). Ce tableau est une proposition évoquée pour le cas d'usage *assainissement* pour structurer les multiples représentations : il reste à l'expérimenter sur projet. Ce tableau est également présent pour le *Gabarit* de l'Objet_I. Contrairement à la première proposition, la cardinalité de la relation entre le gabarit et son Objet_I est maintenant définie comme : « un Objet_I est délimité par 0..* gabarit » (voir Figure 8.1). Selon l'exigence, le gabarit considéré peut être différent (voir section 7.4.4). Il ne s'agit pas uniquement d'une multi-représentation mais bien de la nécessité de définir un nouvel objet gabarit. Cela représente des

gabarits à différentes étapes du cycle de vie de l'objet (en service et en construction ou mise en place par exemple pour une canalisation). Ces gabarits sont totalement distincts, répondent à des exigences différentes et font également partie d'univers du discours séparés.

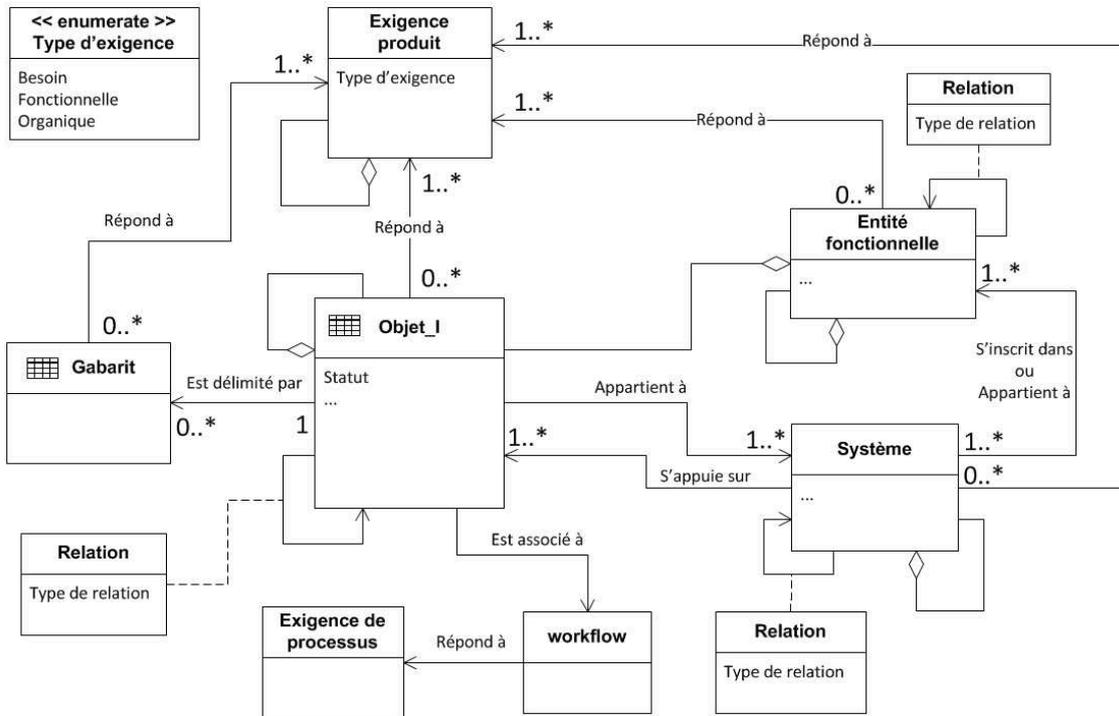


FIG. 8.1 – Proposition du MCD pour *Objet_I* avec considération du retour d'expérience des cas d'usage.

TAB. 8.1 – Proposition de tableau pour la synthèse des représentation des *Objet_I* pour chaque LOA. Ce tableau a vocation à être expérimenté et amélioré avec le traitement d'autres cas d'usage.

	Vue en plan	Profil en travers	Profil en long	Modèle 3D
LOA #	X	X	X	
LOA #				
...				

Dans l'annexe H, les Figures H.5 et H.4 illustre la Figure 8.1 en détaillant l'objet *caniveau* du Système d'assainissement.

Concernant le lien de composition, comme évoqué pour la Figure 6.7 page 158, un *Objet_I* peut être composé d'autres *Objet_I*. Toutefois, la profondeur de l'arborescence créée par ce lien de composition est peu profonde : elle ne porte plus l'ensemble de la structure du modèle d'infrastructure puisque les Entités fonctionnelles et les Systèmes portent également une partie de cette structuration. Il s'agit uniquement des objets de la vue organique. La distinction de relation entre *Entité fonctionnelle - Objet_I* et *Système - Objet_I* est fondamentale. Les entités fonctionnelles sont directement composées d'*Objet_I*. Par contre, bien que les systèmes soient des composants indispensables des entités fonctionnelles, ils *s'inscrivent* ou *appartiennent* aux ouvrages fonctionnels selon qu'ils soient respectivement traversant ou entièrement inclus dans l'Entité fonctionnelle. La relation forte de composition entre *Objet_I* et *Ouvrage fonctionnel* et la relation faible avec les *Système* indique bien la distinction des vues organiques et fonctionnelles. Notons également que les liens entre *Objet_I* et *Système* sont plutôt générique (ces *Système* sont composés d'objets similaires dans différents projets) alors que ceux entre *Entité fonctionnelle* et *Système* sont variables d'un projet à l'autre.

Ces constances ou variabilités des liens de composition ne sont pas immuables mais apportent un éclairage sur la part générique ou spécifique du MCD pour chaque projet. Nous avons également associé l'Objet_I à un workflow pour matérialiser la relation des Objet_I avec les exigences de processus du *système pour faire*. Ce workflow décrit les étapes de validation de l'Objet_I et établit la relation avec le statut de l'Objet_I. Nous ne détaillons pas ces éléments de processus expérimentés sur le projet L2 Marseille puisqu'ils font partie du *système pour faire*. Ces processus décrivent l'état de la données, si elle est fiable, validée ou en cours de conception. Ces éléments ont été expérimentés sur le projet L2 Marseille mais ne sont pas détaillés ici. La Relation qui lie les Objet_I, Système ou Entité fonctionnelle entre eux évoquent au travers du Type de relation la topologie entre objets. Il s'agit d'une composante pour définir complètement les BIM uses en identifiant par exemple les clashes (donc problèmes de topologie) à tester selon les exigences. Nous ne détaillons pas non plus ce point mais en nous basant sur des travaux comme [Parent *et al.*, 1997 ; Mignard, 2012 ; Zoghliami, 2013] qui évoquent ou traitent la topologie et sur notre retour d'expérience, nous affirmons qu'il s'agit d'un sujet à considérer. De manière pratique, nous citons ici un exemple qui montre l'influence de la topologie sur la structuration des objets dans un modèle conceptuel. En avant projet, deux canalisations sont topologiquement liées l'une à l'autre. Lorsque le détail des études augmente, un nouvel objet, un joint par exemple, apparaît dans la structuration. La continuité du réseau est donc évaluée entre chaque canalisation et le joint. Le lien topologique entre deux Objet_I est donc devenu un autre Objet_I. Nous avons pris ici le changement de phase mais une simple représentation à deux niveaux de détails apporte cette même complexité dans la structuration des Objet_I.

Cette proposition de structuration des Objet_I, Entité fonctionnelle et Système, en fonction du niveau d'abstraction (LOA), apporte une décomposition en graphe avec des relations multiples entre objets du MCD. Avec notre proposition, nous nous éloignons d'une arborescence en arbre, unique et inhomogène, décrite tout au long de ce mémoire de thèse. Bien que cette manière de gérer l'information soit dans un premier temps plus complexe qu'une décomposition simplement hiérarchique, nos expérimentations montrent qu'il est ainsi plus efficace de gérer les exigences, de les vérifier avec des modélisations pertinentes et cohérentes et ainsi répondre au mieux aux besoins du projet d'infrastructure. **Il n'est plus question de structurer l'information en fonction des échelles de travail mais bien selon les exigences.** Cette partie de proposition du MCD pour Objet_I décrit la manière dont il faut penser la structuration de l'information. Elle dépend des processus décrits plus haut pour la description du contenu des BIM uses. Par ailleurs, nous avons veillé à rester cohérents avec les standards actuels tels que les IFC (et leurs extensions) et le CityGML. Dans les cas d'usage exposés, rien ne semble contradictoire avec cette affirmation. De prochaines expérimentations vont débiter pour confirmer ce point en travaillant directement avec les outils de modélisation et les standards évoqués et en se basant sur le concept de BIM use.

Dans les chapitres précédents, la généralisation de données a été évoquée. Elle est très liée à la multi-représentation et au concept de LOD de CityGML. Elle s'avère finalement peu présente dans nos expérimentations : ce concept est rarement pratiqué dans la modélisation des données de conception (excepté pour les données environnementales). Aucun besoins de généralisation n'a émergé. Toutefois, avec l'introduction des Level Of Abstraction, la généralisation s'avère nécessaire pour créer des représentation simplifiant la compréhension d'une scène 3D à partir de données plus complexes. La coordination des disciplines notamment nécessite ce type de traitement des données. La synthèse de la conception ne peut considérer l'ensemble des information du projet sans simplification. Nous pouvons rappeler un exemple de généralisation (manuelle) dans le cas des études acoustiques : les bâtiments géométriquement trop complexes sont simplifiés en volumes plus simples et les attributs variés de type d'occupation de ces bâtiments sont rassemblés en seulement cinq catégories. Cette généralisation s'effectue une seconde fois pour transformer des ensembles de bâtiments en un seul bloc pour les étude de

pollution de l'air.

8.1.2 Pertinence de la redéfinition des différents types de niveaux

Notre proposition de LOXi permet une gestion décorrélée des sous-concepts identifiés dans les différents LOD, LOI, LODef et LODt. Nos expérimentations et plus spécialement la préparation à l'audit de sécurité ont mis en évidence la nécessité de décorréler l'information visuelle et géométrique de l'information sémantique et attributaire (voir pour rappel le Tableau 5.6 page 135). Les LOD et LOI proposés constituent des variables d'ajustement pour la modélisation aux différents niveaux d'abstraction. Rappelons que la réponse à certaines exigences peut nécessiter un seul niveau d'abstraction mais plusieurs modélisations de chaque objet, ou l'inverse, ou les deux.

Toutefois, les expérimentations ont montré qu'il n'était pas évident de définir les LOI et LOD pour chaque exigence. Selon les praticiens mais également selon les outils et les données disponibles, l'information liée à chaque « niveau de détail » ou « niveau d'information » varie et n'est donc pas totalement prévisible. Ensuite, les utilisations des LOD et LOI sont variables selon le contexte. Ils peuvent refléter des objectifs de conception, le niveau de maturité maximum de l'information ou seulement l'information nécessaire pour la réponse à une exigence (ce qui est décrit dans les BIM uses et dans les IDM). Les objectifs de conception et le niveau maximum de maturité de l'information font plutôt partie du suivi de la conception et donc des processus du *système pour faire*. Par exemple, d'après le rapport de BIM Forum [BIMForum, 2015], les LODt permettent de mieux planifier le travail des différentes équipes [si ils sont définis comme des objectifs à atteindre]. Également, les LOD et LOI servent d'indicateurs d'avancement de la conception comme le propose par exemple Manzione [2013] (même si des indicateurs complémentaires sont à développer dans ce cas). Pour éclaircir ce point, nous proposons dans la Figure 8.2 d'assigner un rôle au couple LOD - LOI que nous avons proposé selon l'espace (voir pour rappel la Figure 2.2 page 47).

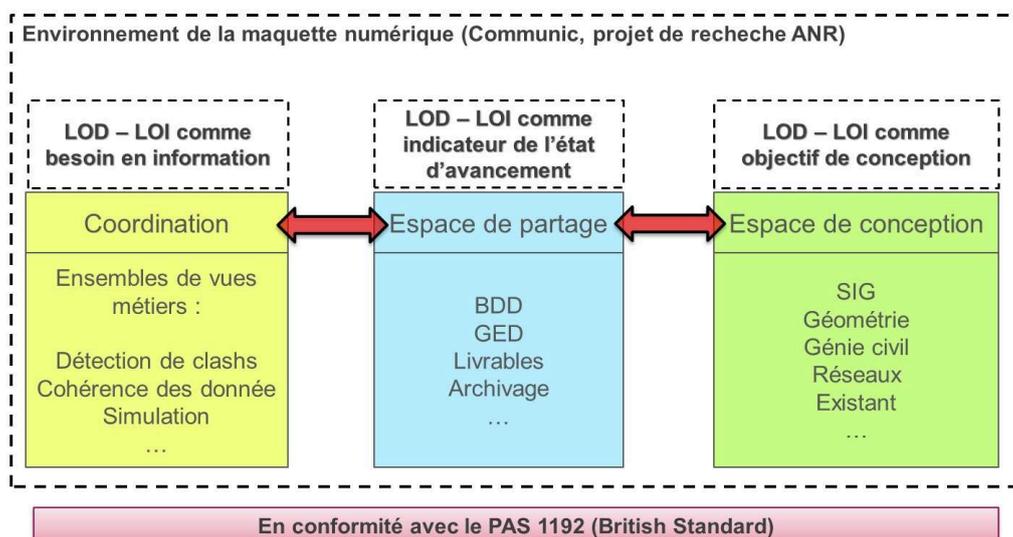


FIG. 8.2 – Exploitation des concepts proposés de LOD et LOI selon l'espace dans lequel ils décrivent l'information du système à faire.

Pour chaque espace, les LOD et LOI sont à définir selon plusieurs éléments : selon le planning de conception et donc selon les exigences à résoudre, selon les phases et le contrat (livraison des livrables) pour l'Espace de partage par exemple.

8.2 Applicabilité de notre proposition

8.2.1 Applicabilité de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences

L'ingénierie système a permis de poser les limites du problème ainsi que les limites des systèmes étudiés. Nous avons ainsi délimité le *système à faire*, son environnement et le *système pour faire*. Certaines frontières restent floues et les limites du projet d'infrastructures ne sont pas parfaitement établies mais cette première approche a permis de structurer les problématiques ainsi que leurs réponses pour chaque cas d'usage traité. L'ingénierie système a également apporté des éléments structurants dans le MCD pour *Objet_I* par la définition de ce qu'est exactement un système. Nous avons ainsi bien distingué les systèmes et les ouvrages fonctionnels, ce qui n'est généralement pas le cas dans les projets d'infrastructures. Nous avons démontré, au travers des cas d'usage traités ci-dessus, la pertinence d'une structuration des *Objet_I* avec une composante système. Pour arriver à une structuration complète d'un projet d'infrastructure, il reste à les identifier tous.

Les exigences sont souvent traitées de manière implicite par les différents bureaux d'étude. L'ingénierie des exigences facilite l'élucidation explicite des exigences. Par contre, la gestion des exigences étant un domaine de connaissance à part entière, nous n'avons pas détaillé les exigences identifiées dans les contrats ou les réglementations. Nous avons donc vérifié la cohérence de notre proposition sur des exigences non décomposées, donc touchant simultanément de nombreux objets¹. La décomposition de ces exigences engendrerait simplement leur affectation à moins d'objets et éventuellement un changement de vue : les exigences fonctionnelles affectées à un système peuvent se décliner en exigences organiques affectées à des *Objet_I*. Les exigences traitées dans les cas d'usage ci-dessus montrent par contre une cohérence satisfaisante avec la proposition de décomposition de l'infrastructure en deux vues, fonctionnelle et organique. Concernant la préparation à l'audit de sécurité, de nombreuses exigences évoquent des univers du discours très similaires. Les répartir selon les thématiques comme la visibilité, la sécurité, l'éblouissement, les gabarits, etc., est une solution : pour une de ces thématiques, les LOI et LOD varient sensiblement selon l'exigence considérée. Par contre, en changeant de thématique, tous les niveaux (d'information, de détail, d'abstraction, les LOXi donc) évoluent. L'abstraction est différente lors du traitement de la visibilité et de la sécurité : les objets concernés ne sont que partiellement similaires. En construisant des ontologies de domaines en se basant sur les documents réglementaires, elles doivent aider à sélectionner les objets pertinents pour chaque thématique. En effet, à chaque thématique correspondent des documents réglementaires².

Au travers du concept de BIM uses, les exigences de produit et les exigences de processus présentent des interactions. Afin de garantir la qualité et la cohérence de l'information et de contrôler la réponse apportée à chaque exigence, les exigences de processus restent à intégrer dans notre démarche. Concernant le *système à faire*, l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences permettent la définition et la structuration cohérente des objets et des exigences. L'indépendance des sous-concepts répartis dans notre proposition de LOXi apporte une réelle aide dans ce travail sur l'information. Elle permet la séparation de l'abstraction, des informations sémantiques et des informations géométriques et visuelles. Par rapport à la proposition de modélisation en trois axes (voir section 6.3 page 151 pour rappel), voici les éléments de conclusion que nous pouvons tirer des cas d'usage traités.

Axe 1 : les univers du discours varient partiellement avec les projets. L'utilisation de l'approche par l'ingénierie système proposée au chapitre 4 constitue une base à réutiliser sur chaque nouveau

1. Les exigences les plus détaillées portent sur la décomposition organique du projet et donc sur quelques objets voir un unique objet.

2. Citons par exemple l'Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière, les guides du Sétra sur la Conception géométrique des routes, etc.

projet afin de valider ou de modifier l'environnement du *système à faire*. Ainsi, les univers du discours (ou ontologies métiers) sont affinés à chaque nouveau projet.

Axe 2 : les LOA ne sont pas hiérarchiques : ils représentent la diversité des éléments des univers du discours relatifs à une ou plusieurs exigences. Ensuite, les LOD et LOI ne sont pas standards et définis dans l'absolu. Ils sont à contrôler ou modifier pour chaque projet sur la base des éléments contractuels et réglementaires (environnement du *système à faire*), des exigences et des processus de conception des équipes).

Axe 3 : notre recherche ne consistait pas à travailler sur les éléments de cette dernière étape qui rassemble pour le *système à faire* les principaux problèmes d'interopérabilité. Concernant le *système pour faire*, cet axe acquiert une plus grande attention puisque la cohérence des formalismes et standards utilisés permet la continuité des processus de gestion de l'information et l'augmentation de sa qualité.

Par rapport à ce dernier point, la description des information manipulées dans les cas d'usage a montré que la complexité de la gestion de l'information provenait également de la difficulté que nous avons à modéliser le modèle conceptuel de données lui-même. L'utilisation de formalismes standardisés *de jure* ou tout au moins *de facto*³ permet de modéliser et de décrire le MCD en limitant les problèmes de forme. La compréhension du modèle conceptuel et ainsi l'adhésion des équipes de production est facilitée.

8.2.2 Application de ces outils conceptuels et exploitation des BIM uses

Dans notre proposition pour la définition et l'utilisation des BIM uses, il reste important de différencier le processus de création des BIM uses (1) (hors projet ou démarrage du projet) de l'utilisation de ces BIM uses en conception (2).

1. Processus de définition des BIM uses : basé sur les outils conceptuels de notre proposition : ingénierie système, ingénierie des exigences, étapes de la modélisation et LOXi.
2. Processus d'extraction des données pertinentes du *système à faire* du projet de conception, voir Figure 8.3.

Un BIM use est défini une fois (bien que son contenu puisse être adapté pendant le projet) mais son exploitation en conception est multiple : ce concept supporte les itérations intrinsèques à l'activité de conception. Le *système à faire partiel* est composé des objets pertinents (dont les *Objet_I* pertinents), des attributs pertinents et des méta-données pertinentes. Le BIM use décrit également les modélisations visuelles des *Objet_I* et les processus liés du projet.

8.3 Modifications à apporter à la première proposition de MCD

Dans les sections ci-dessus, quelques proposition de modifications sont faites concernant la partie *Objet_I* du MCD. Nous discutons dans cette section des autres modifications à apporter à notre proposition de MCD suite aux expérimentations. Il s'agit principalement d'adaptation pratiques des outils conceptuels utilisés, en particuliers sur les diagrammes issus de l'analyse du projet par l'ingénierie système et par l'ingénierie des exigences.

Les expérimentations décrites ci-dessus amènent à un constat fort, contraire à ce qui avait été indiqué dans la Figure 4.9 page 96. Si le processus de conception n'intègre pas à la fois les exigences de processus et les exigences de produit, des dysfonctionnements apparaissent dans les processus de

3. *de facto* : adopté par les usagers, l'industrie ou un secteur professionnel à cause de leur popularité et de leur part de marché ; *de jure* : suite à sa publication par un organisme de normalisation officiel.

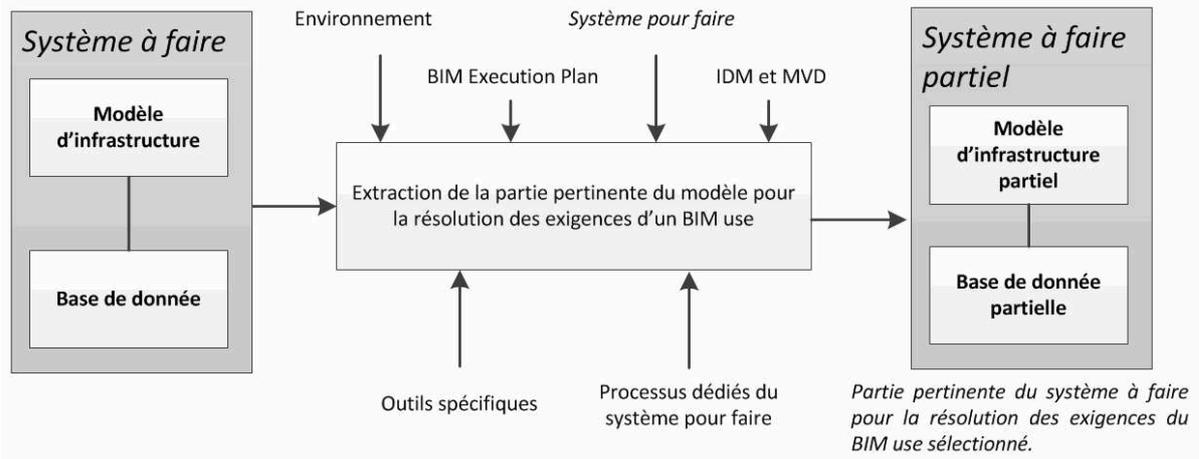


FIG. 8.3 – SADT du processus d'application d'un BIM use (étape 2 ci-dessus) défini préalablement dans l'étape 1 grâce à notre proposition de MCD.

production de l'information, altérant ainsi sa qualité. Cet ensemble constitué du *système pour faire* et du *système à faire* nécessite une utilisation simultanée. Il n'est pas efficient de mettre en place une architecturation du *système à faire* basée sur la résolution des exigences sans réorganiser les processus de conception du *système pour faire*, et réciproquement. L'ingénierie système permet cette séparation pour en simplifier leur construction mais nécessite une mise en cohérence pour une exploitation simultanée. De manière opérationnelle, les procédures mises en place sur nos projets ont dû être modifiées pour intégrer à la fois les processus de conception et le Modèle Conceptuel de Données (MCD) du projet. L'évaluation de notre proposition de MCD sur des cas d'usages a montré la nécessité de conserver cette étroite imbrication des éléments de processus et de gestion de l'information au sein d'un même concept, le BIM use. Ainsi, l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences *beneficient* toujours au *système à faire* mais par l'intermédiaire du *système pour faire*. Nous illustrons cela dans la vue générale des outils et concepts en Figure 8.4.

Nous avons basé notre proposition de MCD concernée par l'ingénierie système sur l'ouvrage de Fiorèse et Meinadier [2012] (voir Figure 4.2 page 85 pour rappel). Comme pour la figure précédente, suite aux expérimentations, nous avons adapté cette proposition. Concernant les constituants de ce diagramme, seuls deux éléments sont ajoutés : il s'agit du *Contexte existant physique* et du *Contexte existant organisationnel* (voir Figure 8.5 partie de droite). Ces contextes diffèrent de l'Environnement défini précédemment. L'ajout de ce premier contexte (physique) permet de rappeler qu'une infrastructure est construite pour fonctionner avec des systèmes et un environnement physique déjà existant. Cet existant physique (éléments physiques dans lequel s'inscrit le projet d'infrastructure) se compose de systèmes. L'infrastructure s'inscrit dans ce contexte et s'y raccorde. Elle perturbe donc les systèmes existants (écoulement naturel des eaux de ruissellement par exemple, qui est un système) et doit du point de vue contractuel ou réglementaire (loi sur l'eau par exemple) proposer des solutions techniques de rétablissement (systèmes hydrauliques qui raccordent les parties de ce système existant non perturbées par le projet d'infrastructure pour continuer cet exemple). De manière similaire, nous avons ajouté le *Contexte existant organisationnel* pour le *système pour faire* (ou Projet). Cet élément représente le contexte dans lequel se déroule le projet de conception. Sont considérés les autres projets de l'entreprise, les équipes, les processus de management en place, etc., donc les systèmes déjà en place avec lesquels ce Projet interfère. Le *système pour faire* s'inscrit donc bien dans un contexte existant, composé également de systèmes bien qu'ils soient de nature différente de celle des systèmes du *système à faire*. Ensuite, comme illustré dans les cas d'usage, chaque BIM use peut être considéré comme un *système pour faire*, partie du *système pour faire* du projet de conception, avec comme objectif la production d'un

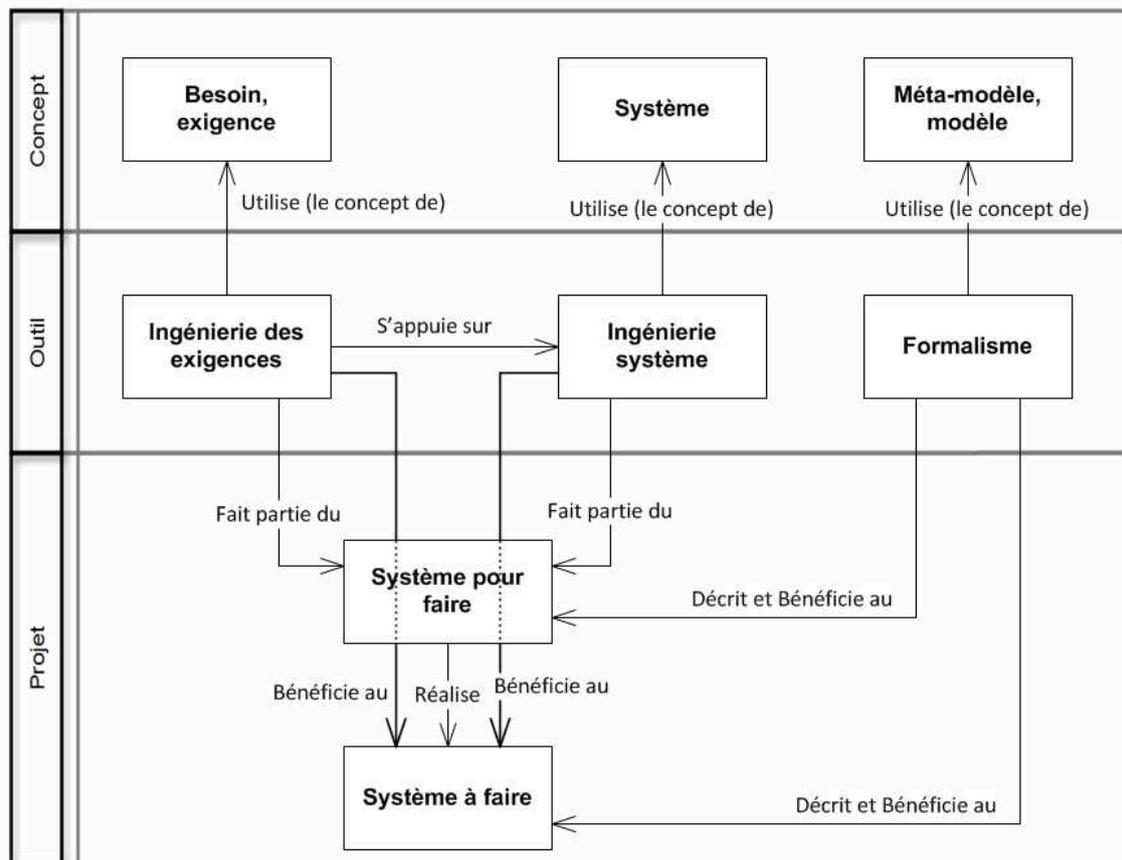


FIG. 8.4 – Modifications apportées à la Figure 4.9 page 96 suite au retour d'expérience de l'implantation du BIM sur le projet L2 Marseille.

système à faire, partie du *système à faire* du projet de conception. Donc ces deux *systèmes à faire* et *pour faire* se composent avec eux-mêmes. Certains liens ont été modifiés pour être en cohérence avec les autres diagrammes. Nous avons mis au centre de ce diagramme le *Projet* : il répond à un besoin et a pour objectif de concevoir un produit (ou *système à faire*). Les BIM uses rassemblent ces deux éléments pour répondre aux besoins et exigences. Le fait de préciser que le *Projet* répond à un *Besoin* et pas que le *Besoin* induit un *Projet* rend explicite que le projet n'est pas uniquement fonction de la réponse aux besoins. Il prend en compte le Contexte existant dont nous venons de parler et les projets parallèles comme l'achat du foncier (voir illustration en Figure 8.5). Les deux Contextes existants, physiques et opérationnels, mettent en lumière certaines raisons de la difficile mise en place du BIM. Les modifications apportées par cette manière de travailler doit s'intégrer dans ce contexte existant.

Cette Figure 8.5 reprend les relations évoquées pour la Figure 8.4 : les processus de conception basés sur la gestion des exigences passent déjà par le *système pour faire* avant d'arriver au *système à faire* qui répond aux exigences de produit. Les BIM uses assurent la cohérence entre ces deux systèmes : ils sont composés à la fois de processus et des définitions des structurations des objets du *système à faire*.

Pour clore cette quatrième partie et avant de conclure ce mémoire, nous proposons la Figure 8.6, pour préciser notre démarche présentée en fin de première partie. Les principaux sujets évoqués tout au long de ce mémoire sont replacés dans cette Figure 8.6 par rapport à notre démarche double top-down et bottom-up. Ainsi, nous résumons les concepts et outils méthodologiques qui constituent notre proposition de modèle conceptuel et notre proposition de démarche de modélisation de l'information

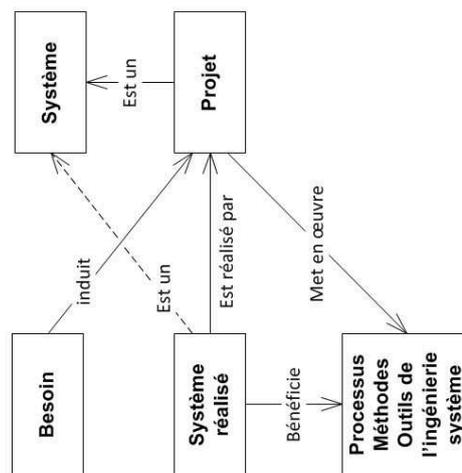
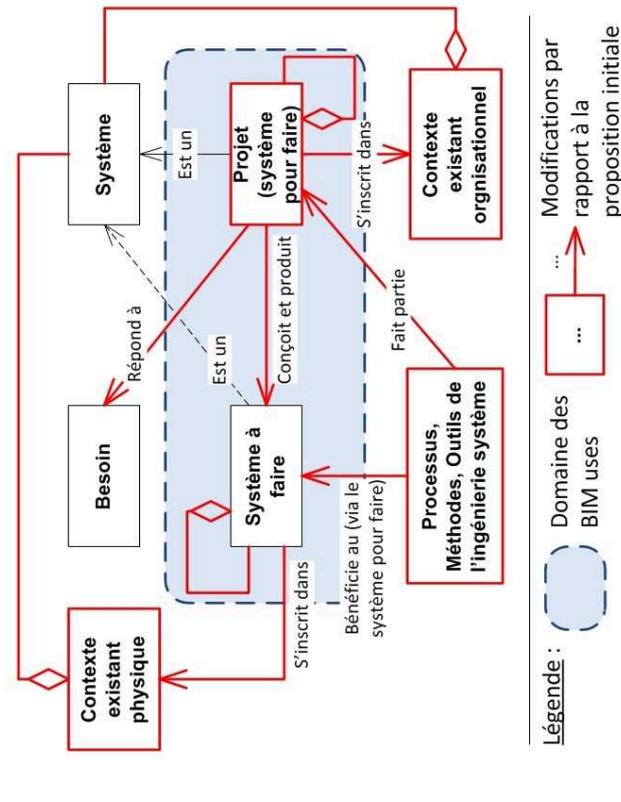


FIG. 8.5 – A gauche la première proposition issue de Fiorèse et Meinadier [2012]. A droite notre adaptation de la partie de gauche suite aux expérimentations de notre proposition de MCD. Les modifications, en rouge, remettent le *Projet* au centre des attentions.

pour la mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines.

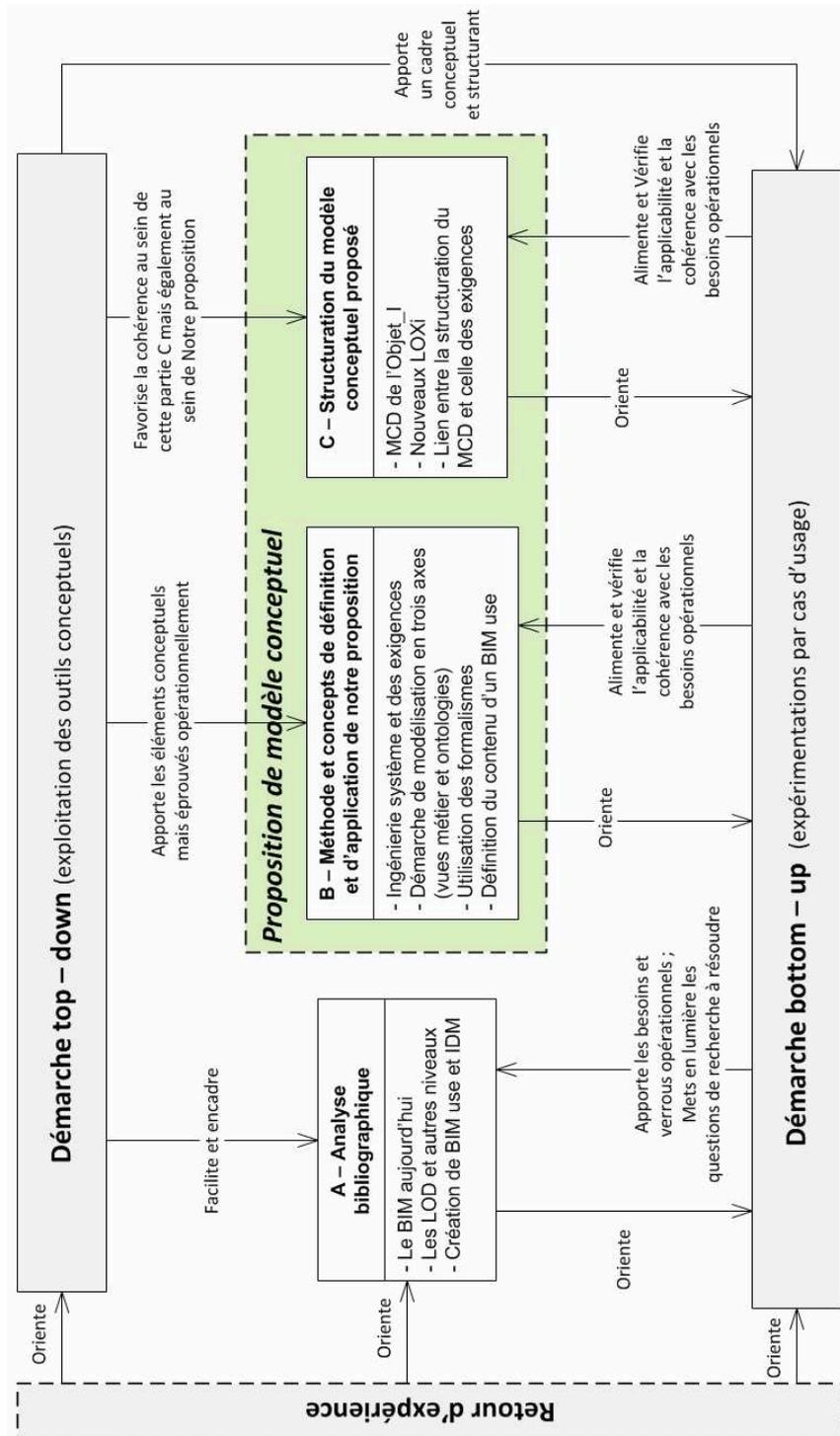


FIG. 8.6 – Illustration détaillée de notre démarche de recherche et positionnement de notre proposition de contribution.

Conclusion de la quatrième partie

Dans cette partie, nous avons tout d'abord défini plus précisément le concept de *BIM use*. Cette définition approfondie nécessitait l'étude d'autres concepts qui permettent de définir le contenu des BIM uses et de comprendre leur fonction au sein d'un projet. Nous avons ensuite appliqué notre proposition de méthode (fin de la deuxième partie) et de Modèle Conceptuel de Données (fin de la troisième partie) sur deux cas d'usage sélectionnés dans l'optique de mettre à l'épreuve notre proposition au travers de sollicitations variées. Cette partie se termine par la description des modifications à apporter à notre proposition suite à ces expérimentations : ainsi nous apportons une composante très opérationnelle à notre recherche.

Notre proposition est applicable à ces deux cas d'usage. Nous avons ainsi défini le contenu des BIM uses, excepté la partie processus (éléments du *système pour faire*). Nous pouvons toutefois relever certaines limites.

Cette approche *bottom - up* ne garantit ni la cohérence entre les modélisations, résultats de l'application de notre méthode sur les cas d'usage, ni leur complétude par rapport aux besoins du projet. Donc cette démarche par cas d'usage, pour alimenter le modèle globale du projet, a besoin d'être confrontée au résultat de l'analyse par l'ingénierie système de tout le projet de conception comme nous l'avons proposé dans la deuxième partie. Ce travail permet d'être certain de considérer l'ensemble des exigences qui portent sur le projet (réglementation, contrat, parties prenantes du projet, processus de création de l'information). Du point de vue de la modélisation en trois axes, le constat est identique. Comment garantir de manière automatique la cohérence de ces modélisation définies au travers de plusieurs cas d'usage par rapport aux autres modélisation du projet ? Comment garantir que l'utilisation du couple LOD - LOI redéfini est cohérente pour définir le contenu des BIM uses et qu'il n'existe pas un couple LOD - LOI par acteur, par objet et par phase ? Cela inhiberait l'intérêt de ces concepts et ne serait d'aucune aide dans l'interopérabilité et pour les processus d'ingénierie concourante. Nous proposons dans les perspective une piste qui permettrait d'apporter une solution de contrôle de la cohérence des modélisations des cas d'usage. De plus, rappelons qu'un modèle reste une représentation simplifiée de la réalité. Ce besoin de contrôle automatique de cohérence s'avère donc indispensable puisque l'application totalement générique de notre modèle conceptuel n'est pas possible. Les projets de constructions sont toujours des ouvrages uniques avec une organisation des acteurs et des responsabilités toujours changeante contrairement aux industries manufacturières.

Ensuite, certaines adaptations plus fines de notre proposition sont nécessaires. Elles traduisent les besoins concrets des équipes de production. D'autres seront à apporter lors du choix des outils qui nécessitent des modification lors de l'implantation du MCD, d'où également la nécessité d'un contrôle automatique de la cohérence des modèles évoquée ci-dessus. Nous n'avons pas appliqué notre méthode à l'étude du *système pour faire* mais les cas d'usage fournissent une majorité des éléments nécessaires

à sa définition (acteurs, échanges, exigences, représentation, etc.).

Enfin, comme l'écrit [Simon \[1982\]](#), la forme de la conception influe sur le résultat. Ainsi, la structuration de l'information n'est pas anodine. Elle ne peut être le résultat de choix arbitraires uniquement basés sur les capacités des outils à gérer l'information dans des standards propriétaires. L'expérimentation de la structuration que nous proposons dans cette partie doit faire l'objet d'autres cas d'usage. Ils sont à sélectionner de manière pertinente pour évaluer l'influence que peut avoir notre proposition de structuration sur la réponse aux exigences.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans une approche technique du Génie Urbain. Les infrastructures routières urbaines et leur modélisation en conception constituent notre sujet d'étude. Nous les examinons du point de vue technique et les considérons comme des systèmes qui doivent s'intégrer dans un environnement existant à la fois fonctionnel, physique et informationnel.

La question initiale de cette recherche était uniquement tournée vers l'utilisation du concept de « niveau de détail » pour structurer l'information et en décrire les échanges. Mais nous avons rapidement dû poser un cadre de réflexion pour identifier les besoins et poser précisément les questions auxquelles les concepts de « niveau de détail » ou de « niveau de développement » tentent de répondre. Notre recherche s'est ainsi orientée vers la définition des besoins informationnels d'un projet pour ensuite évaluer la pertinence de ces niveaux dans leur actuelle définition. Nous avons donc développé en parallèle un Modèle Conceptuel de Données (MCD) et une méthode pour définir les éléments de ce MCD et interroger le contenu des *BIM uses*. Par conséquent, de nombreux concepts sont abordés. L'originalité de ce travail réside dans ses interactions avec plusieurs domaines de connaissances comme les ontologies ou l'ingénierie système, qui ne sont pas couramment utilisés dans la construction.

Cette partie vise tout d'abord à rappeler les apports de notre recherche pour le domaine de la construction d'infrastructures. Nous évoquons ensuite les limites de notre proposition. Enfin, nous proposons plusieurs perspectives qui permettraient de pallier à ces limites et d'élargir notre contribution à l'application des processus d'ingénierie concurrente.

Contenu et apports de nos travaux

La définition du contenu des Information Delivery Manual (IDM) et *a fortiori* des BIM uses est un objectif central en ce sens qu'ils interrogent à la fois les processus de conception et la structuration de l'information. Cela revient à considérer l'ensemble des exigences d'un projet de conception, qu'elles soient de processus ou de produit. Nous nous sommes approprié des outils méthodologiques, l'ingénierie système et l'ingénierie des exigences, rarement utilisés dans le domaine de la construction. Ainsi, nous avons défini de manière structurée et cohérente :

- les principaux moyens d'analyse du projet pour définir les systèmes à *faire* et *pour faire* ainsi que les environnements qui les contraignent ;
- une méthodologie et des outils conceptuels, les LOXi, pour structurer le contenu informationnel des BIM uses, indispensable au travail en ingénierie concurrente ;
- un MCD pour structurer l'information, issue de l'utilisation de l'ingénierie système, en cohérence avec les exigences à satisfaire.

Au travers de ces éléments, nous avons mis en évidence :

- le lien indissociable entre les processus de conception et la structuration de l'information,
- la nécessité de redéfinir les différents niveaux (de détail, de développement, de définition, d'abstraction) du fait de la mauvaise identification des questions auxquelles ils répondent et de leur incompatibilité dans une utilisation conjointe sur un projet d'infrastructure routière,
- la nécessité d'une structuration de l'information en graphe plutôt qu'en arbre, ce qui implique une utilisation des ontologies de domaine pour perfectionner la cohérence sémantique entre métiers ainsi que les échanges d'informations,
- la nécessité de considérer à la fois des outils conceptuels et des expérimentations pour construire les BIM uses et permettre leur réutilisation sur plusieurs projets en ne redéfinissant qu'une partie non générique, intrinsèque à la variabilité des projets de construction.

Dans notre recherche décrite dans ce mémoire, nous nous sommes efforcés de construire un ensemble cohérent de concepts qui permettent de lier l'information avec les processus de son utilisation. Évidemment, les standards d'échange restent indispensables. Comme l'expliquent [Allemang et Hendler \[2011\]](#) dans leur ouvrage sur le web sémantique et les ontologies, disposer de données intelligentes ne suffit pas pour en faire une exploitation efficace. Tout un écosystème autour de ces données est nécessaire. Par exemple, les méta-données en font partie. Utiliser un fichier IFC avec tous les objets et attributs sans mises-à-jour cohérente n'est d'aucune aide dans un processus de travail collaboratif, peu importe la complexité et « l'intelligence » des application consommant ces données. Nous avons complété notre proposition de MCD pour un `Objet_I` par des processus et des outils conceptuels pour décrire l'infrastructure en conception en cohérence avec les standards existants. Nous avons donc contribué à l'utilisation du BIM que nous avons défini dans notre première partie.

Élargissement et adaptabilité de notre proposition

Un champ de validation à élargir

Notre proposition se compose de deux parties. La première partie qui est méthodologique, a été appliquée au *système à faire* pour aider à la structuration des objets qui le constituent. Elle n'a pas été appliquée au *système pour faire*. Par conséquent, nous n'avons encore pu vérifier la réelle applicabilité de notre méthodologie sur la partie processus de l'activité de concevoir. La cohérence entre les objets de chaque *système* n'a donc pas pu être contrôlée. Nous proposons dans les perspectives des outils pour cela. La seconde partie concerne la structuration de l'information. Nous avons basé notre recherche uniquement sur les projets d'infrastructures routières urbaines. Il serait par conséquent nécessaire d'appliquer notre proposition à d'autres types d'infrastructures. De plus, nous ne décrivons ici que deux cas d'usage sélectionnés pour leur complémentarité. Bien que la préparation à l'audit de sécurité interroge une majorité des objets, ces deux exemples ne suffisent pas à couvrir l'ensemble des exigences et `Objet_I` d'un projet. L'étude d'autres cas d'usage a commencé au sein d'Egis : nous pouvons citer le dimensionnement des réseaux d'assainissement longitudinaux (spécifique à un système), la revue de projet technique (qui traite des interfaces entre métiers), les équipements d'exploitation (qui rejoint la préparation à l'audit de sécurité mais entre plus dans le détail du fonctionnement des différents systèmes de sécurité, de gestion de trafic, de signalisation, etc.) ou l'étude de l'emplacement d'un passage à faune (cas d'usage traité dans le cadre du projet MINnD, UC 6 tranche 2). Les résultats permettront d'affiner notre proposition. Ils vérifieront qu'elle permet d'aller jusqu'à la définition des MVD sans redondance de données. Ainsi, il sera également plus aisé de distinguer la méthodologie de construction du contenu des BIM uses de la méthodologie de leur application sur projet.

Le difficile changement des pratiques

Évacuons tout d'abord une question qui n'apporte rien à la manière d'aborder les changements en cours : « est-ce que le BIM est une révolution ? » Il est souvent présenté comme tel. Nous avons

vu qu'il n'est en fait que la traduction d'un changement de paradigme pour l'activité de concevoir. L'ingénierie système peut également être présentée comme un nouveau paradigme. Mais un changement de paradigme n'implique pas que tout ce qui faisait l'ancien monde, les anciennes pratiques, disparaisse. Donc, d'importants changements dans les pratiques et les outils sont à prévoir mais de manière plus douce qu'une révolution. D'après notre travail, ces changements concernent l'adaptation à la pensée systémique de l'ingénierie système, à la structuration explicite des exigences, à l'utilisation automatique de formalismes standardisés ou encore à la considération de la valeur réelle d'une information de qualité. Ces pratiques ne sont pas courantes dans l'industrie de la construction, à tel point que leur introduction dans le secteur de la construction devrait tout de même créer un « choc des cultures ».

Lors des expérimentations de mise en place du BIM, des freins à ces changements sont inévitables. Et pourtant, d'après notre travail et les perspectives ci-dessous, il apparaît que pour optimiser l'utilisation du BIM, faciliter notre évolution dans le paradigme de la *conception abstraite* et faire face aux paradoxes sur l'information de conception, nous devons aller plus en profondeur dans ces changements et nous approprier ces champs de compétences. Notre proposition implique un changement dans la manière de penser la production de l'information. Sa mise en place impacte les activités de conception. Nous l'avons évaluée au travers du prisme de l'ingénierie système et de la cohérence des modèles. Mais l'utilisation de cette proposition est portée par des équipes humaines. Ainsi, d'autres critères de validation seront à considérer pour prendre en compte les besoins opérationnels liés à l'environnement social et culturel des acteurs du projet. Cette approche doit permettre d'accompagner au mieux l'actuel changement de paradigme.

Nous souhaitons terminer cette partie par deux citations. Il convient de les nuancer mais elles doivent perdurer dans les esprits pour accompagner le changement en cours dans l'industrie de la construction. Tout d'abord, d'après [Bellanger \[2014\]](#), « s'il nous faut aujourd'hui nous adapter à la machine plutôt que l'inverse [bien que nous puissions prétendre le contraire], c'est parce que nous avons méprisé la culture numérique ». Ensuite, la seconde citation en parfait accord avec les freins actuels de la mise en place du BIM⁴ :

Quand on affronte les réalités de demain avec les représentations mentales et les organisations d'hier, on a les drames d'aujourd'hui.

Hervé Sérieyx, 2003.

4. Merci à Didier Allaire qui a mis cette citation dans son propre manuscrit de thèse.

Perspectives et pistes de recherche

Tout au long de notre recherche, plusieurs champs disciplinaires furent approchés, considérés, analysés ou intégrés dans notre proposition. Tout d'abord, les infrastructures étant à la convergence de trois mondes, il était indispensable de considérer simultanément les approches et structurations de l'information de la géomatique, du génie urbain et du génie civil. Ensuite, nous avons intégré des concepts absents du domaine de la construction. Dans ce sens, nous proposons ci-dessous plusieurs pistes centrales pour la structuration et l'exploitation de l'information.

La considération des ontologies

Nous avons montré la nécessaire considération des ontologies dans notre démarche de modélisation et de définition des BIM uses. Mais nous n'avons fait qu'effleurer ce vaste champ d'étude.

D'une part, est-il possible de traiter tous les problèmes d'interopérabilité et de cohérence sémantique entre modèles avec des ontologies? Certains travaux répondent par l'affirmative : tout doit être « ontologisé » pour garantir la cohérence des modèles (pour la création d'une infrastructure de gestion de l'information géospatiale) [Stock *et al.*, 2012]. D'autre part, « Quelle différence entre une ontologie et un Modèle Conceptuel de Données (MCD)? » et « Quelles sont, dans notre contexte, les relations entre les ontologies et le MCD? ».

Pour Fankam *et al.* [2009], une ontologie décrit les concepts d'un domaine d'un point de vue assez général, indépendamment de chaque application précise et de tout système dans lequel elle est susceptible d'être utilisée. A l'opposé, un MCD prescrit l'information qui doit être représentée dans un système informatique particulier pour faire face à un besoin applicatif donné. Il existe plusieurs approches pour alimenter soit les ontologies à partir d'un MCD, soit l'inverse. Les ontologies de domaine peuvent être exploitées comme outil d'aide à la conception de MCD. L'approche proposée permet également la validation de MCD existants par rapport à une ontologie du même domaine [Fankam *et al.*, 2009]. Nous retrouvons cette approche *a priori* (création d'ontologies puis du MCD) dans la démarche de modélisation en trois axes. Par contre, les ontologies construites à partir d'un corpus de textes, par extraction, peuvent être assez pauvres : pas d'attributs, ontologies peu formelles ou incomplètes. Construire une ontologie plus complète à partir de textes nécessite de considérer à la fois le texte, mais également sa structure [Kamel et Aussenac-Gilles, 2009]. Donnons quelques exemples de documents que nous supposons pertinents pour la construction d'ontologies. Ils seraient utilisables pour diminuer l'incomplétude dans la description du contenu sémantique des BIM uses. Le rapport de préparation à l'audit de sécurité ainsi que le rapport d'avis des services instructeurs de l'État peuvent être exploités comme textes de référence pour définir une ontologie spécifique à cette étude de sécurité. Ces documents contiennent des termes métiers. Ils sont également très structurés. Une autre possibilité concerne l'exploitation des spécifications des bases de données géographiques. D'après Abadie et Mustière [2008], « la majeure partie de la sémantique des bases de données géographiques se trouve dans les spécifications mêmes de ces bases ». Nous évoquons les ontologies pour compléter notre MCD mais nous imaginons également pouvoir les utiliser pour lier sémantiquement les exigences avec les objets du *système à faire*. La Figure 8.7 place les ontologies par rapport à ces perspectives.

Enfin, nous avons concentré notre réflexion sur la phase de conception. Or, les gains liés à l'utilisation de processus BIM sont évalués comme étant plus importants pour l'exploitation comme expliqué en première partie. Il conviendrait de sélectionner des cas d'usage qui permettent de contrôler la cohérence de notre structuration avec les besoins des exploitants. Les ontologies permettraient en parallèle d'assurer la continuité sémantique entre les objets décrits pendant les phases de conception, de réalisation et d'exploitation. Pour replacer ces perspectives dans un cadre plus large et appuyer ces propositions, nous pouvons évoquer des travaux visant à définir des ontologies pour les projets d'infrastructures. Cette recherche prendra place dans le cadre du projet MINnD et débutera en 2017.

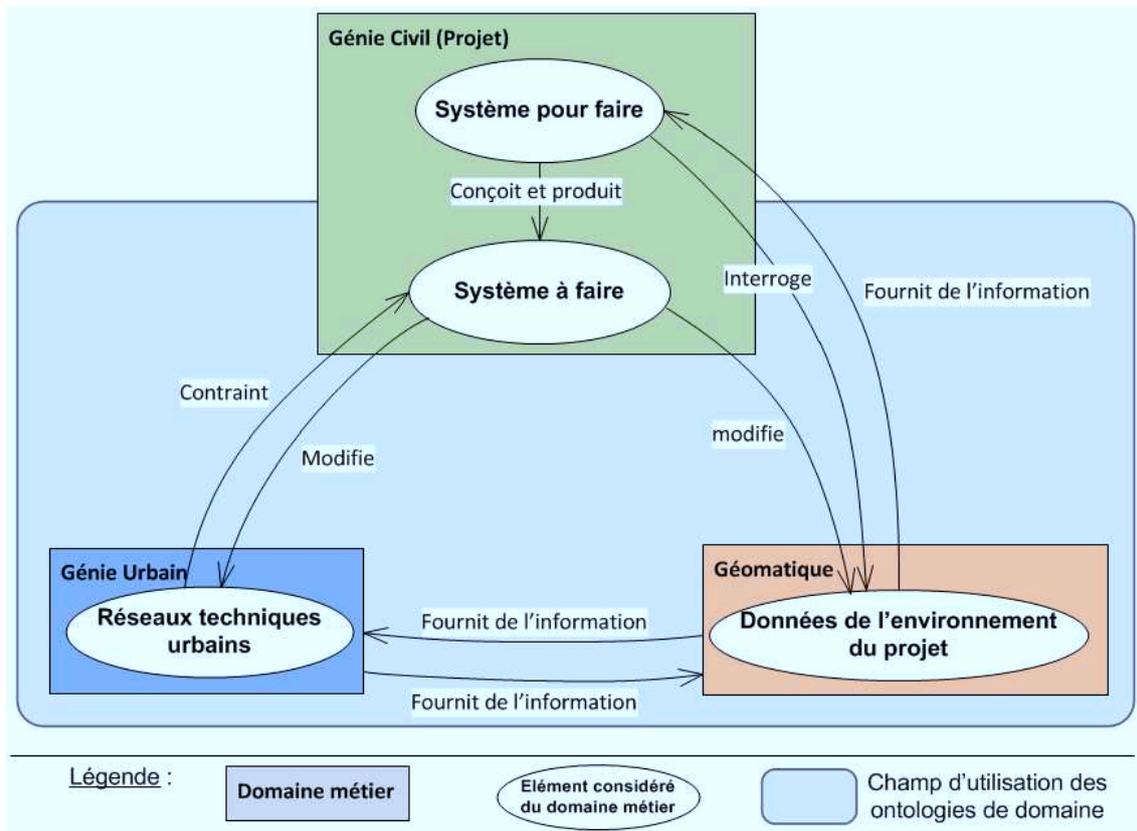


FIG. 8.7 – Place des ontologies de domaine pour améliorer la cohérence sémantique entre les trois domaines qui concernent les projets d'infrastructures routières urbaines.

L'ingénierie système et l'ingénierie des exigences

Dans notre recherche, l'ingénierie système a été appliquée au *système à faire* : elle doit maintenant l'être sur le *système pour faire* dans l'optique de définir les éléments de processus des IDM et des BIM usés et de contrôler la cohérence entre les objets communs à ces deux systèmes, à *faire* et *pour faire*.

Ensuite, le maintien d'un référentiel d'exigences est indispensable à l'exploitation efficace du système [Badreau et Boulanger, 2014]. En effet, la phase d'exploitation d'une infrastructure routière est au minimum de plusieurs dizaines d'années. Les exigences liées aux performances de l'ouvrage (trafic supporté, nuisances sonores, sécurité des usagers, etc.) ou à l'impact environnemental (traitement des eaux de ruissellement, interruption des continuités écologiques, etc.) peuvent varier sur ce temps long. La gestion des exigences constitue un domaine de compétence que l'industrie de la construction doit s'approprier, d'autant plus qu'un nombre important d'exigences ne sont pas facilement formalisables. Cette propriété est indispensable pour leur gestion qui sans cela reste délicate. Par exemple pour la conception d'un éco-pont ou l'évaluation de l'impact de l'infrastructure sur la faune, la réglementation reste assez floue. Ainsi, comment formaliser ces exigences ? Comment les conserver sur un temps long ainsi que les données liées ? Ces questions découlent du besoin d'évaluer dans le temps la pertinence de l'emplacement d'un éco-pont ou de mesures compensatoires. Une gestion structurée des exigences sur tout le cycle de vie d'une infrastructure linéaire est indispensable. Elle commence dès la conception par une structuration cohérente entre les exigences et les autres objets des modèles du projet.

L'Ingénierie Système Basée sur les Modèles et l'Ingénierie Dirigée par les Modèles

Au démarrage d'un projet de conception, la cohérence du contenu de tous les BIM usés avec l'environnement contractuel et réglementaire du projet doit être contrôlée. Cette étape nécessite des outils tels que l'ingénierie dirigée par les modèles (Model Driven Engineering, MDE)⁵. Toutefois, il semble que ces approches ne trouvent actuellement pas leur place dans le domaine de la construction (à notre connaissance, seuls quelques travaux abordent ce sujet [Kubicki, 2006 ; Halin et Kubicki, 2007 ; Boton, 2013] dans un contexte BIM). Suite à notre recherche, nous proposons plusieurs pistes pour leur introduction.

L'Ingénierie Système Basée sur les Modèles (MBSE)⁶ est une méthodologie particulière de l'ingénierie système. D'après Micaelli *et al.* [2011], MBSE est une variante de l'ingénierie système qui pousse le plus loin possible l'hypothèse de la *conception abstraite* selon laquelle, concevoir c'est modéliser. Le « tout est objet » devient peu à peu depuis les années 2000 le « tout est modèle » [Kadima, 2005]. Ainsi, tout processus concourant de la conception à pour objet le modèle. Sont à considérer :

- en entrée, un modèle à transformer ;
- en sortie, un modèle transformé transmis à un tiers comme ressource ;
- de quoi élaborer le modèle (langage, formalisme, logiciel, etc.).

La MBSE introduit également l'idée d'une description multi-vues et multi-diagrammes d'un artefact [objet]. En effet, les systèmes aujourd'hui conçus ne peuvent être appréhendés avec une vue unique et donc un diagramme unique [Micaelli *et al.*, 2011] : nous l'avons également démontré tout au long de ce mémoire. La MBSE permet d'assurer un pont sémantique entre différents formalismes qui modélisent les mêmes concepts [Auzelle, 2009]. Cette approche permet de travailler à la mise en cohérence des différents modèles du *système à faire* et du *système pour faire* selon les points de vue métiers et selon les acteurs qui travaillent sur les mêmes objets. Il y a donc possibilité de coordonner les modèles de structuration des objets et des modèles de processus.

En comparaison, dans un environnement très influencé par le génie logiciel, nous retrouvons le MDE (Model-Driven Engineering ou Ingénierie Dirigée par les Modèles), approche qui étudie l'usage des modèles dans les processus d'ingénierie. Comme dans tout processus d'ingénierie, le processus est indissociable du produit. Le produit est le résultat à atteindre, tandis que le processus est le chemin qu'il faut parcourir pour atteindre le résultat [Hammoudi, 2010]. Cette approche s'intéresse plutôt à la transformation de modèle avec une vision mono-métier contrairement à l'approche MBSE plutôt transversale et multi-métier [Favre *et al.*, 2006 ; Hammoudi, 2010 ; Auzelle, 2009]. D'après Sannier et Baudry [2011], l'ingénierie dirigée par les modèles propose un cadre méthodologique et technologique qui permet d'unifier différentes façons de procéder de manière homogène par l'utilisation intensive des modèles. Enfin, comme l'écrivent Fanmuy *et al.* [2014], la MDE prône le tout modèle comme support de communication et de spécification. Ces modèles apportent plus de valeur à l'information de conception.

Ensuite, lorsque l'on évoque le sujet des *modèles*, il est nécessairement question des *méta-modèles*. La méta-modélisation est le nom donné communément à la pratique consistant à utiliser un modèle pour décrire un autre modèle comme une instance [Hammoudi, 2010 ; Allemang et Hendler, 2011]. C'est ce que proposent certains travaux dans un contexte de coopération : le méta-modèle est instancié (comme une classe) pour donner un modèle (entité de cette classe) [Halin et Kubicki, 2005, 2006]. Voici d'autres éléments de précision sur ce concept d'après Billen *et al.* [2008] : le préfixe « méta » vient du grec [et signifie dans ce contexte *au-delà de*]. Le terme « méta-modèle » désigne un niveau d'abstraction

5. Nous retenons l'acronyme anglophone Model-Driven Engineering (MDE), évoqué précédemment, pour ne pas confondre l'Information Delivery Manual (IDM, lié au BIM) et Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM également en français).

6. Pour rester cohérent avec la note précédente, nous retenons donc l'acronyme MBSE pour Model Based System Engineering et non ISBM (Ingénierie Système Dirigée par les Modèles).

supérieur [au-delà du modèle] et exprime la réflexion, l'auto-référence. Pour [Billen et al. \[2008\]](#), « un méta-modèle consiste donc en la définition formelle des éléments, des règles, des contraintes. . . qui régissent la création d'un modèle. Le modèle, comme le méta-modèle, sont réalisés en utilisant un formalisme. Le formalisme est décrit dans le méta-modèle. Néanmoins, ce même formalisme peut être utilisé pour construire le méta-modèle comme c'est par exemple le cas pour l'UML ». Le méta-modèle décrit le lien [le langage] existant entre le modèle et le système qu'il représente (voir Figure 8.8). La méta-modélisation consiste à définir les concepts à utiliser pour modéliser les systèmes [que l'on cherche à décrire] [[Kadima, 2005](#)]. Enfin, retenons que d'après [[Favre et al., 2006](#)] le *modèle* :

- doit être conforme au *métamodèle* ;
- représente le *système modélisé*.

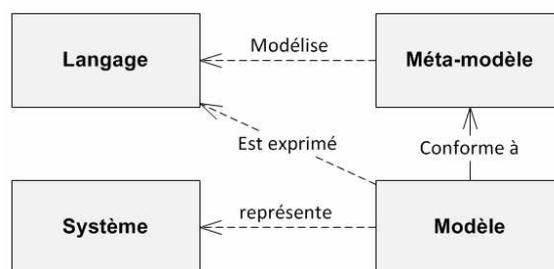


FIG. 8.8 – Relations entre système, modèle, méta-modèle et langage, d'après [[Hammoudi, 2010](#)].

Dans un contexte d'ingénierie concourante, [Dartigues \[2001\]](#) démontre bien que le choix d'un modèle unique n'est pas nécessairement le plus pertinent. Les outils de transformation de modèles facilitent aujourd'hui la conception basée sur une approche multi-modèles pour une meilleure considération des besoins des acteurs. Étant donné que les changements actuels dans les pratiques de conception (nouveau paradigme de la *conception abstraite*) et les possibilités offertes par certains champs de recherche (transformation de modèles, ontologies), le travail autour d'un modèle 3D unique n'est plus une solution d'avenir pour le BIM. C'est pourtant la vision couramment répandue dans le milieu de la construction.

Enfin, d'après [Micaelli et al. \[2011\]](#), le modèle acquiert le rang de véritable ressource foncière, d'autant plus qu'il est réutilisable d'un projet sur l'autre. Ainsi, cette manière de penser la conception, le projet, en se basant sur des modèles, apporte à l'information de conception de la valeur supplémentaire. D'après [Fanmuy et al. \[2014\]](#), les approches basées sur les modèles et celles basées sur les exigences sont complémentaires. Ce qui signifie que les objectifs que nous avons fixés pour le seul concept de BIM use peuvent effectivement être supportés simultanément par notre proposition d'utilisation de l'ingénierie système et de l'MBSE. Nous proposons en Figure 8.9 une vision du lien entre les modèles et l'ingénierie système. Le projet ne permet donc pas uniquement de créer le produit à réaliser, il génère également de l'information de qualité qui participe à celle du *système à faire* du projet de conception. Le BIM tel que nous l'envisageons correspond à cette vision pour le domaine de la construction. Dans un contexte d'ingénierie concourante, la coordination des BIM uses, dédiés à la résolution d'exigences et à la sélection de l'information pertinente dans ce but, a besoin de ces méthodologies de transformation de modèles.

Nous proposons un MDC qui nécessite d'être modélisé par plusieurs formalismes. En effet, l'ingénierie concourante et le travail collaboratif impliquent l'utilisation de nombreux outils, avec des modèles d'objets, des processus et des concepts qui leurs sont propres pour manipuler des objets communs. La MDE et la MBSE apportent selon nous des outils et méthodes qui permettent de conserver une cohérence entre ces multiples modèles. La première application pratique que nous pouvons évoquer est la validation de la cohérence des BIM uses entre eux, ou l'évaluation automatique sur ces BIM uses, de

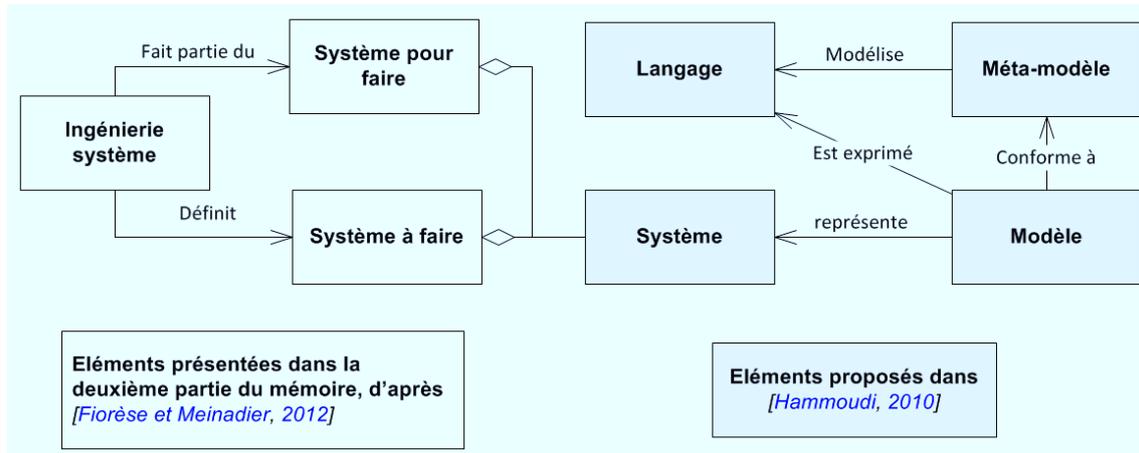


FIG. 8.9 – Relations entre l'ingénierie système et les concepts de modèle, méta-modèle et langage.

l'impact de modifications dans les processus de conception. La Figure 8.10 illustre la place de la MBSE par rapport aux domaines métier interrogés par un projet d'infrastructure routière urbaine. Le Génie Urbain pourra également exploiter cette approche en complément de sa considération de longue date de l'approche systémique du milieu urbain [Rochet et Peignot, 2013; Dupuy et Benguigui, 2015].

Pour conclure cette première approche de MDE et MBSE, il n'est pas certain que la distinction soit toujours parfaitement claire. Les nuances n'apparaissent que rarement dans les définitions. De plus, bien que ces nouvelles approches (ingénierie système, ingénierie des exigences et ingénierie dirigée ou basée sur les modèles) semble pertinentes dans le contexte actuellement changeant de la conception, aucun ne peut revendiquer une position industrielle ou académique bien établie, du fait de leur caractère inachevé [Micaelli *et al.*, 2011]. Comme nous l'avons brièvement décrit dans [Castaing et Tolmer, 2015], il semble que le secteur de la construction ne soit pas tout à fait prêt à intégrer ces concepts⁷. Par contre, nous avons identifié l'importance de l'utilisation de formalismes et de modèles pour conserver une cohérence entre les différentes modélisations utilisés dans nos projets. Le travail prospectif présenté dans cette section vise à donner les premiers éléments de l'introduction de ces outils dans notre profession pour un travail en adéquation avec le paradigme de la « conception abstraite ».

Représentation visuelle de l'information

La représentation visuelle de l'information peut sembler anecdotique par rapport à la structuration du MCD. Et pourtant, la représentation visuelle participe à l'interprétation humaine de l'information. Des éléments sur ce sujet sont présentés en Annexe F. Comme explicité dans cette annexe, l'observation est facilitée à la fois par les consignes et la mise en évidence de certains éléments afin de faciliter la compréhension et l'analyse des scènes visuelles. Ces éléments (consignes et manière de modéliser certains éléments d'une scène, par exemple en fonction de la qualité ou de la précision de l'information représentée) font également partie du contenu des BIM uses. Ainsi, les utilisateurs de modèles 3D visuels accèdent et étudient un modèle spécifique à leurs analyses et objectifs, simplifié par la manière de représenter les points d'intérêt de chaque exigence à traiter. Ces méthodes sont également développées pour la recherche d'information dans une BDD [Hascoët et Beaudouin-Lafon, 2001]. Ajoutons enfin que, comme l'explique S. Parfouru dans sa thèse de doctorat, « le choix des modalités de visualisation de données constitue un exercice difficile au sens où il est complexe d'espérer anticiper sur les besoins

7. Après discussion avec des experts de ces sujets dans d'autres industries et d'après [Krob, 2014b], l'application de ces ingénieries n'est pas non plus évidentes à traiter pour des entreprises habituées à ces approches.

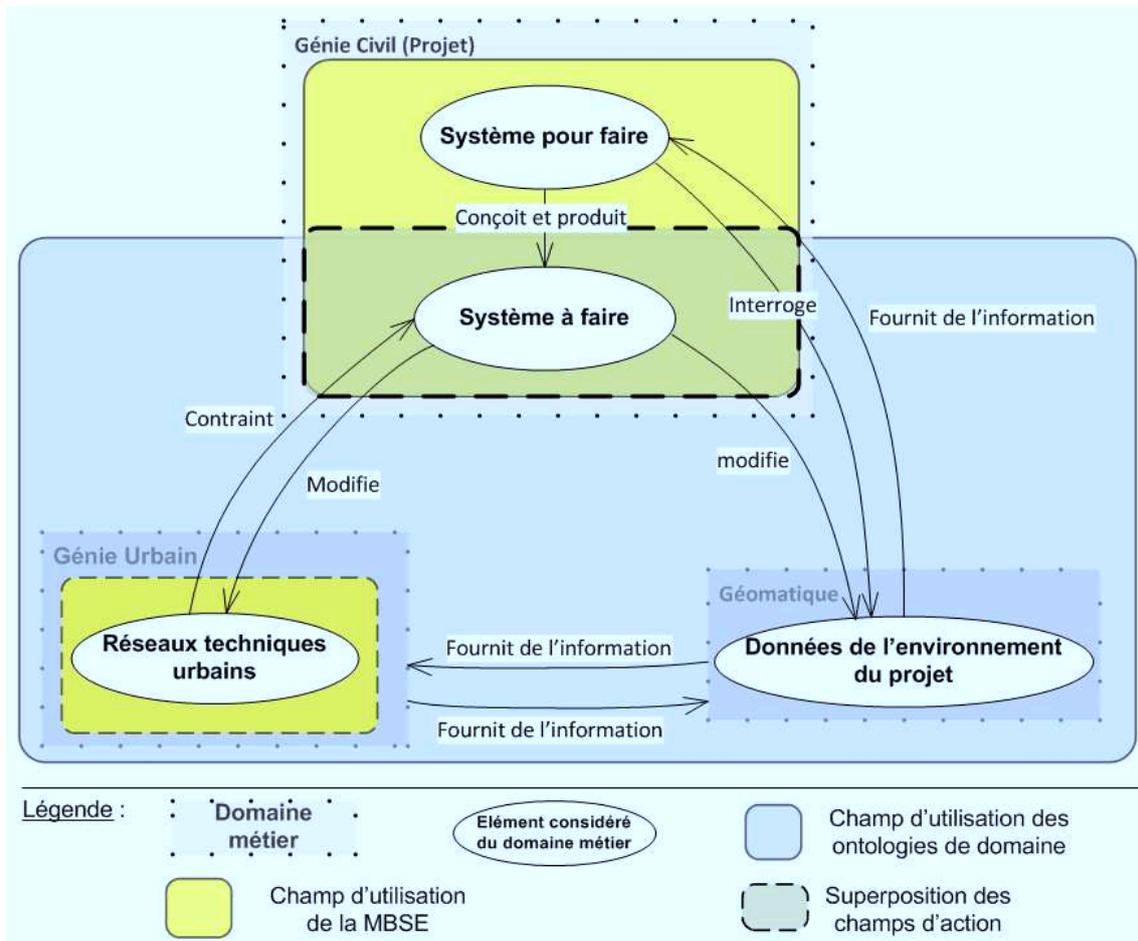


FIG. 8.10 – Place de la MBSE pour l'évaluation de la cohérence structurelle des modèles entre les trois domaines qui concernent les projets d'infrastructures routières urbaines.

de l'utilisateur » [Parfouru, 2008]. La définition de règles de représentation visuelle de l'information est pour nous une piste à ne pas négliger dans le développement du BIM.

Comme nous venons de le démontrer tout au long de ce mémoire de thèse, la question du détail de l'information diffusée et modélisée demeure centrale pour l'intégration des projet d'infrastructures linéaires au sein du milieu urbain existant. L'information est produite et structurée par des acteurs aux points de vue différents. Nous avons proposé une méthode ainsi que des outils structurants pour décrire l'information pertinente par rapport aux exigences à traiter. La cohérence de cet ensemble informationnel provient de l'utilisation de modèles conceptuels de données. Ces derniers étant structurés en partie par les approches d'ingénierie système et d'ingénierie des exigences. Nous avons également montré les apports complémentaires des ontologie et de la MBSE sur ce point central. La capacité de l'information à représenter l'ouvrage sur tout son cycle de vie viendra d'une mise en cohérence sémantique subtile de ces concepts, en cohérence avec les différents *niveaux* proposés dans cette thèse de doctorat (niveaux de détail, d'information et d'abstraction). L'intégration de l'infrastructure dans son milieu urbain sera facilitée tant du point de vue physique, que fonctionnel et informationnel.

Bibliographie

- ABADIE, N. et MUSTIÈRE, S. (2008). Constitution d'une taxonomie géographique à partir des spécifications de bases de données. *In SAGEO*, Montpellier.
- ADOLPHE, L. (1991). *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale*. Thèse de doctorat, Doctorat, Ecole Des Mines de Paris.
- AFIS (2012). *Bonnes pratiques en ingénierie des exigences*. Cépaduès édition.
- AFITEP (2010). *Dictionnaire du management de projet*. Afnor édition.
- AIA (2013). Project Building Information Modeling Protocol Form Document G202 - 2013. Rapport technique.
- ALLEMANG, D. et HENDLER, J. (2011). *Semantic web for the working ontologist, Effective modeling in RDFS and OWL*.
- AMAREL, S. (1966). On the mechanization of creative processes. *In Spectrum 3*, pages 112–114. Ieee édition.
- ANDRÉ, J. (2013). Petites leçons de typographie. Rapport technique, IRISA, Éditions du jobet.
- ARTHAUD, G. (2007). *Apports de modèles de comparaison structurelle et sémantique à la synchronisation de la maquette numérique de construction : application aux ponts*. Thèse de doctorat.
- ASSOUROKO, I., DUCELLIER, G., BENOÎT, E. et BOUTINAUD, P. (2009). Méthodes et protocoles d'échange et de gestion d'information dans la chaîne CAO - CALCUL. *In 6ème Colloque International Conception et Production Intégrées*.
- AUDIBERT, L. (2014). *UML 2 de l'Apprentissage à la Pratique*. Ellipses édition.
- AUZELLE, J.-p. (2009). *Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un système d'information en entreprise centré sur le produit*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- AZHAR, S. (2011). Building Information Modeling (BIM) : trends, benefits, risks and challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering, ASCE*, pages 241–252.
- BACHIMONT, B. (2006). Qu'est-ce qu'une ontologie ?
- BADREAU, S. et BOULANGER, J.-L. (2014). *Ingénierie des exigences. Méthodes et bonnes pratiques pour construire et maintenir un référentiel*. Paris, dunod édition.
- BAHU, J.-M., KOCH, A., KREMERS, E. et MURSHED, S. M. (2013). Towards a 3D spatial urban energy modelling approach. *In ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2*, volume II, pages 33–41, Istanbul, Turkey.
- BARLES, S., TRAISNEL, J.-P., MAIZIA, M., RUDOLF, F., DIAB, Y. et MORAND, D. (2006). Ville et durabilité : questions pour la recherche, question à la recherche. *In UNIVERSITÉ FRANCOIS RABELAIS, éditeur : Quatre ans de recherche urbaine 2001-2004. Volume 2*, pages 23–33.

- BARRAU, A. (2016). *De la vérité dans les sciences*.
- BARROCA, B. et SERRE, D. (2012). De la ville qui sépare à la ville qui intègre. *Ville durable. Energie Urbanisme*, pages 32–35.
- BARROCA, B., SERRE, D. et DIAB, Y. (2012). Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(2).
- BATTY, M., DODGE, M., JIANG, B. et SMITH, A. (1998). GIS and urban design. *Working / discussion paper*.
- BEAUDE, B. (2014). *Les fins d'internet*. Fyp editio édition.
- BÉDARD, Y. (1999). Visual modelling of spatial database : toward spatial PVL and UML. *Geomatica*, 53(2) : 169–186.
- BELLANGER, P. (2014). *La souveraineté numérique*. Stock édition.
- BENNER, J., GEIGER, A., GROGER, G., HAFELE, K.-h. et LOWNER, M.-o. (2013). Enhanced LOD concepts for virtual 3D city models. *In ISPRS Annals of the Photogrammetry*, volume II, pages 27–29, Istanbul, Turkey.
- BENNER, J., GEIGER, A. et LEINEMANN, K. (2005). Flexible generation of semantic 3D building models. pages 17–22, Bonn. Proc of the 1st Intern. Workshop on Next Generation 3D City Models.
- BERARD, O. et KARLSHOEJ, J. (2011). Information Delivery Manuals. *In CIB W078 - W102 : CIB W078 - W102*, pages 148–158, Sophia Antipolis, France.
- BERTI-EQUILLE, L. (2012). *La qualité et la gouvernance des données*. Lavoisier édition.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H. et STOTER, J. (2014a). Improving the consistency of multi-LOD CityGML datasets by removing redundancy. *In ISPRS 9th 3DGeoInfo Conference, United Arab Emirate, Dubai*.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H., STOTER, J. et ZHAO, J. (2014b). Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48.
- BILJECKI, F., ZHAO, J., STOTER, J. et LEDOUX, H. (2013). Revisiting the concept of level of detail in 3D city modelling. *In ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference*, volume II, pages 63–74, Istanbul, Turkey. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-2/W1, Volume.
- BILLEN, R., CUTTING-DECELLE, A.-F., MARINA, O., de ALMEIDA, J.-P., CAGLIONI, M., FALQUET, G., LEDUC, T., MÉTRAL, C., MOREAU, G., PERRET, J., RABINO, G., SAN JOSE, R., YATSKIV, I. et ZLATANOVA, S. (2014). *3D City Models and urban information : Current issues*. EDP Sciences, european c édition.
- BILLEN, R., LAPLANCHE, F., ZLATANOVA, S. et EMGARD, L. (2008). Vers la création d'un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine. *XYZ*, 114 :37–42.
- BILLEN, R. et ZLATANOVA, S. (2003). 3D spatial relationships model : a useful concept for 3D cadastre? *Computers, Environment and Urban Systems*.
- BIMFORUM (2015). Level of development specification. Rapport technique.
- BONIERBALE, T. (2004). *Éléments pour l'évaluation de la qualité environnementale des systèmes d'assainissement urbains*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée.
- BOOCH, G. (1992). *Conception orientée objets et applications*. Addison-we édition.
- BORRMANN, A., FLURL, M., RAMOS, J., MUNDANI, R.-p. et RANK, E. (2014). Synchronous collaborative tunnel design based on consistency-preserving multi-scale models. *Advanced Engineering Informatics*, 28 :499–517.
- BORRMANN, A., JI, Y., JUBIERRE, J. R. et FLURL, M. (2012). Procedural Modeling : A new approach to multi-scale design in infrastructure projects. *EG ICE Workshop on Intelligent Computing in Civil Engineering*.

- BORRMANN, A., KOLBE, T., DONAUBAUER, A., STEUER, H. et JUBIERRE, J. R. (2013). Transferring Multi-Scale Approaches From 3D City Modeling To Ifc-Based Tunnel Modeling. *In ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume II, pages 75–85, Istanbul, Turkey.
- BOT, L. et VITALI, M.-L. (2011). *Modélisation et activités des ingénieurs*.
- BOTON, C. (2013). *Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction*. Thèse de doctorat, l'Université de Lorraine.
- BOTON, C. et KUBICKI, S. (2014). Maturité des pratiques BIM. Dimensions de modélisation, pratiques collaboratives et technologies. *In SCAN'14 Séminaire de conception architecturale numérique, Interaction(s) des maquettes numériques*, pages 44–56, Luxembourg.
- BOUZEGHOUB, M. (2006). Les bases de données et l'IDM. *In L'ingénierie dirigée par les modèles, Au delà du MDA*, chapitre 6. Lavoisier édition.
- BRASEBIN, M. (2014). *Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- BREUNIG, M. et ZLATANOVA, S. (2011). 3D geo-database research : Retrospective and future directions. *Computers & Geosciences*, 37 :791–803.
- BRITISH STANDARD (2007). British Standard BS 1192. Rapport technique, British Standard Institute.
- BSI (2015). BIM Toolkit.
- BUILDINGSMART (2013). IFC4 Official release.
- BUILDINGSMART (2016). BuildingSMART International.
- BURCIN, B.-G. et RICE, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the U.S. building industry. *Journal of Information Technology in Construction*, (February) :185–201.
- CANI, M.-P. (2015a). 01. Modélisation géométrique constructive : choix d'une représentation. *In Cours du collège de France*.
- CANI, M.-P. (2015b). 03. Modélisation 3D à partir de dessins 2D. *In Cours du collège de France*, Paris, France.
- CASSOU-NOGUÈS, P. (2007). *Les démons de Gödel, Logique et folie*. Seuil édition.
- CASTAING, C. et TOLMER, C.-e. (2015). Gestion et modélisation des informations pour les projets d'infrastructures : vers l'ingénierie système, la gestion d'exigences et l'IDM. *Génie logiciel*, Septembre :28–40.
- CHARROUX, B., OSMANI, A. et THIERRY-MIEG, Y. (2010). *UML 2 Pratique de la modélisation*. Pearson édition.
- CHAUVIN, S. (2005). *Visualisations heuristiques pour la recherche et l'exploration de données dynamiques : L'art informationnel en tant que révélateur de sens*. Thèse de doctorat, Paris 8.
- CHAUVIN, S. (2008). *Information et visualisation. Enjeux, recherches et application*. Cépaduès édition.
- CHETTAOUI, H. (2011). *Interopérabilité entre modèles hétérogènes en conception coopérative par des approches d'Ingénierie Dirigée par les Modèles*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- CHIPMAN, T., LIEBICH, T. et WEISE, M. (2012). mvdXML : Specification of a standardized format to define and exchange Model View Definitions with Exchange Requirements and Validation Rules. *buildingSMART International Ltd.*, V 1.0(Document id : ITM-120507) :34.
- CHOAY, F. et MERLIN, P. (2010). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Puf édition.

- CIB W078 - W102 (2011). Computer , Knowledge , Building. *In CIB W078 - W102 : CIB W078 - W102*, page 994, Sophia Antipolis, France.
- CIB W78 (2015). Actes de la conférence CIB W78. Rapport technique, International Council For Research And Innovation In Building And Construction, Eindhoven, Pays-Bas.
- CIEVANSKY, F. et SONNTAG, M. (2011). Modélisation figurative et schématisation. *In L'HARMATTAN*, éditeur : *Modélisation et activités des ingénieurs*, chapitre 6.
- COMMUNIC L1 (2010). Livrable L1 - Modèle global. Rapport technique, ANR.
- COMMUNIC L2 (2010). Livrables L2 : Recommandations de mise en œuvre de la maquette numérique. Rapport technique, ANR.
- COMMUNIC L3 (2010). L3 : Programme fonctionnel de la maquette numérique. Rapport technique, ANR.
- CONSEIL NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (1994). Eléments d'un vocabulaire géomatique. Rapport technique, Conseil national de l'information géographique, CNIG.
- CORMIER, L. (2011). *Les Trames vertes : entre discours et matérialités, quelles réalités?* Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- COSTA, A. A. (2011). Integrated taxonomies and building information modeling in construction. *In CD do 2º Forum Internacional de Gestão da Construção – GESCON 2011. Sistemas de Informação na Construção. Editadas pela Secção de Construções Cívicas*, Porto.
- CULLOT, N., PARENT, C., SPACCAPIETRA, S. et VANGENOT, C. (2003). Des SIG aux ontologies géographiques. *Revue internationale de géomatique*, 13.3 :285–306.
- DARTIGUES, C. (2001). État de l'art sur l'Ingénierie concurrente. Rapport technique.
- DE ROSNAY, J. (1975). *Le microscope, Vers une vision globale*. Editions d'édition.
- DEBRAUWER, L. et VAN DER HEYDE, F. (2005). *UML2 Initiation, exemples et exercices corrigés*. Nantes, France, édition en édition.
- DEHAENE, S. (2011). Les formes de la géométrie et l'universalité des intuitions mathématiques. *In Colloque de rentrée 2011 du Collège de France : la vie des formes (4)*.
- DEVYS, E. et GESQUIÈRE, G. (2012). Interopérabilité et intégration des données et modèles urbains : standards , normes et tendances pour les SIG. Rapport technique, LSIS, UMR CNRS 6168 Aix-Marseille.
- DI NARDO, M. (2015). Comment concevoir la durabilité du fonctionnement urbain en situation de crise? Réflexions par le métabolisme, le risque et l'aménagement urbain. *In La résilience en action, Séminaire du Lab'Urba*, Lab'Urba, Université Paris Est Marne la Vallée.
- DIAB, Y. (2000). Génie civil urbain et environnement : quelques pistes de recherche. page 200, Habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie - Chambéry.
- DIAB, Y. (2014). Note pour le Conseil, Scientifique de l'UPEMLV, Le Laboratoire de Recherche en Génie Urbain (LRGU) Positionnement et projet 2015-2019. Rapport technique, Université Paris Est Marne-La-Vallée.
- DOUFENE, A., CHALÉ G, H. G., DAURON, A. et KROB, D. (2014). Un cadre méthodologique intégré pour l'architecture et l'optimisation de systèmes. *Génie Logiciel*.
- DUPUY, G. (1984). Villes, systèmes et réseaux : le rôle historique des techniques urbaines. *Réseaux*, 2(4) :3–23.
- DUPUY, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, Théories et méthodes*. Paris, France, armand col édition.
- DUPUY, G. et BENGUIGUI, L. G. (2015). Sciences urbaines : interdisciplinarités passive, naïve, transitive, offensive. *Métropoles (En ligne)*, 16.

- EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R. et LISTON, K. (2011). *BIM Handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Wiley and édition.
- EL-MEKAWY, M. (2010). Integrating BIM and GIS for 3D city modelling, the case of IFC and CityGML. Rapport technique November, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- EL-MEKAWY, M. et ÖSTMAN, A. (2010). Semantic mapping : an ontology engineering method for integrating building models in IFC and CityGML. *In 3rd ISDE DIGITAL EARTH SUMMIT*, Nessebar, Bulgaria.
- EL-MEKAWY, M., OSTMAN, A. et HIJAZI, I. (2012). An evaluation of IFC-CityGML unidirectional conversion. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(5) :159–171.
- EMGARD, L. et ZLATANOVA, S. (2008). Design of an integrated 3D information model. *In GIS, OTB, Delft University of Technology*. The Netherlands, delft univ édition.
- EUCLID'S ELEMENTS (1996). Euclid's elements.
- EYNARD, B. (2005). *Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- FANKAM, C., BELLATRECHE, L., DEHAINSALE, P., AIT AMEUR, Y. et PIERRA, G. (2009). SISRO : Conception de bases de données à partir d'ontologies de domaine. *Technique et Science Informatiques*, 28.
- FANMUY, G., DURANTIN, A. et FARDEL, J.-P. (2014). Les modèles remplacent-ils les modes traditionnels de représentation de définition des exigences? *Génie logiciel, Ingénierie système*, 111.
- FAVRE, J.-M., ESTUBLIER, J. et BLAY-FORNARINO, M. (2006). *L'ingénierie dirigée par les modèles, Au delà du MDA*. Lavoisier édition.
- FERNÁNDEZ-SÁEZ, A. M., GENERO, M. et CHAUDRON, M. R. V. (2012). Does the Level of Detail of UML Models Affect the Maintainability of Source Code? *Models in Software Engineering*, 7167 :134–148.
- FERRIÈS, B. et BONHOMME, M. (2014). La maquette numérique, un moyen d'augmenter la densité informationnelle d'un territoire? *In SCAN'14, Séminaire de conception architecturale numérique*, pages 189–198, Luxembourg.
- FERRIÈS, B. et LÉGLISE, M. (2006). Frictions entre mondes hétérogènes. *In 3rd International Conference on the Virtual City and Territory*, BILBAO.
- FIORÈSE, S. et MEINADIER, J.-P. (2012). *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. Collection AFIS (Associations Française d'Ingénierie Système), cépaduès édition.
- FLÉTY, Y. (2014). *Vers une mise en observation des Systèmes Énergétiques Territoriaux – une approche géographique pour territorialiser l'énergie*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- FLETY, Y. et DE SEDE, M.-H. (2009). Vers une géo-ontologie pour les systèmes énergétiques territoriaux. *In Ontologies et dynamique des systèmes complexes*, Megève.
- FOX, K., MORTON, B. et RAMOS, J. (2013). The business value of BIM for construction in major global markets. Rapport technique, McGraw Hill Construction.
- FRÉDÉRICQUE, B., DANIEL, S., BÉDARD, Y. et PAPANODITIS, N. (2008). Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une BD à représentations multiples. Vers une approche intégrée. *Revue Internationale de Géomatique*, 18/1 :67–94.
- FUND, M., LAFFRÉCHINE, K., MORAND, D. et ALLAIRE, D. (2015). Principles for modeling structural covers over road and rail infrastructures in urban areas.
- GALLAHER, M. P., O'CONNOR, A. C., DETTBARN, J. L., JR. et GILDAY, L. T. (2004). Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U. S. Capital Facilities Industry. Rapport technique, National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S. Department of Commerce Technology Administration.

- GIL, J., ALMEIDA, J. et DUARTE, J. (2011). The backbone of a City Information Model (CIM). *In 29th eCAADe conference*, pages 143–151.
- GIL, J. et DUARTE, J. (2008). Towards an urban design evaluation framework. *In the eCAADe conference*, pages 257–264, Antwerpen, Belgium.
- GOBIN, C. (2001). L'ingénierie concourante - Un nouveau professionnalisme. Rapport technique, Techniques de l'Ingénieur.
- GROGER, G. et PLUMER, L. (2012). CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71 :12–33.
- GROUPE STRUCTURATION DE DONNÉES (1991). Synthèse des modèles conceptuels développés dans le cadre de la recherche bâtiment en France. Rapport technique, Groupe Structuration de Données.
- GRUBER, T. R. (1993). A Translation Approach to Portable Ontology Specifications.
- GUIBERT, S., DARSEES, F. et BOUJUT, J.-f. (2009). Using annotations in a collective and face-to-face design situation. Numéro Septembre, pages 191–206, Vienna, Austria. 11th European conference on computersupported cooperative work.
- GUILLOTTE, K., BÉDARD, Y., LARRIVÉE, S. et BADARD, T. (2009). Conception et développement d'un outil de modification de la segmentation routière. *Géomatica*, 63(4) :365–381.
- GUYOT, E. (2007). *Gestion de données techniques et structuration des échanges au sein de partenariats de co-développement aéronautique*. Diplôme de recherche technologique, Université Bordeaux 1.
- HAGEDORN, B., TRAPP, M., GLANDER, T. et DÖLLNER, J. (2009). Towards an indoor Level-of-Detail model for route visualization. *In Tenth International Conference on Mobile Data Management : Systems, Services and Middleware*, pages 692–697. IEEE.
- HALIN, G. et KUBICKI, S. (2005). Architecture dirigée par les modèles pour une représentation multi-vues du contexte de coopération. *In IHM Conference*, pages 211–214. ACM Press.
- HALIN, G. et KUBICKI, S. (2006). Une infrastructure basée sur les modèles pour le développement d'une plateforme multi-vues d'assistance à la coordination. *In IHM, 18e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, Montréal, Canada.
- HALIN, G. et KUBICKI, S. (2007). Une approche par les modèles pour le suivi de l'activité de construction d'un bâtiment. Bat'iViews : une interface multi-vues orientée gestion de chantier. *In XXVe congrès InforSid*, pages 419–436, Palais des Congrès, Perros-guirec, 22700.
- HAMILTON, A., WANG, H., TANYER, A., ARAYICI, Y., ZHANG, X. et SONG, Y. (2005). Urban information models for city planning. *ITcon, Special Issue From 3D to nD modelling*, 10 :55–67.
- HAMMOUDI, S. (2010). *Contribution à l'étude et à l'application de l'ingénierie dirigée par les modèles*. Habilitation à diriger des recherches, Université d'Angers.
- HARVARD UNIVERSITY (2013). Harvard BIM uses guide. Rapport technique, Harvard University, Planning and project management, Harvard.
- HASCOËT, M. et BEAUDOUIN-LAFON, M. (2001). Visualisation interactive d'information. *CEPAD*.
- HOWARD, R. et BJORK, B.-C. (2008). Building information modelling – Experts' views on standardisation and industry deployment. *Advanced Engineering Informatics*, 22 :271–280.
- INSPIRE THEMATIC WORKING GROUP BUILDINGS (2013). INSPIRE - Data Specification on Buildings - Draft Technical Guidelines. Rapport technique.

- INSPIRE THEMATIC WORKING GROUP TRANSPORT NETWORKS (2009). INSPIRE Data Specification on Transport Networks – Guidelines. Rapport technique, Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE).
- ISIKDAG, S. et ZLATANOVA, S. (2009). Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using BIM. In Lee and Zlatanova (eds.), *3D geo-information sciences, LNG&C*, Springer Verlag, chapitre Chapter 6, pages 79–96.
- ISO 29481-1 (2012). ISO 29481-1 2012 Building Information Modeling - Informations Delivery Manual Part 1 : Interaction framework. Rapport technique, ISO.
- ISO 29481-2 (2012). ISO 29481-2 2012 Building Information Modeling - Informations Delivery Manual Part 2 : Interaction framework. Rapport technique, ISO.
- JOLIVET, L. (2014). *Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique - analyse et simulation*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- JOUINI, S. B. M. et MIDLER, C. (1996). L'ingénierie concourante dans le bâtiment, Synthèse des travaux du Groupe de Réflexion sur le Management de Projet (GREMAP). Rapport technique, Ministère du Logement, Plan Construction et Architecture.
- KADIMA, H. (2005). *MDA Conception orientée objet guidée par les modèles*. Paris, France, dunod édition.
- KAMEL, M. et AUSSENAC-GILLES, N. (2009). Construction automatique d'ontologies à partir de spécifications de bases de données. In *Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances*, Hammamet, Tunisie.
- KEMEC, S., ZLATANOVA, S. et DUZGUN, S. (2009). Selecting 3D urban visualisation models for disaster management : A rule-based approach. In *Proceedings of TIEMS 2009 Annual Conference*, pages 9–11.
- KEUNG, J. (2013). *BIM Essential Guide For BIM Execution Plan*.
- KOLBE, T. H. et GROGER, G. (2003). Toward unified 3D city models. In *ISPRS Comm. IV Joint Workshop on "Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II"*, Stuttgart.
- KOLBE, T. H., GROGER, G. et PLUMER, L. (2005). CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. Delft. International symposium on geo-information for disaster management.
- KREIDER, R. et MESSNER, J. (2013). The Uses of BIM : Classifying and Selecting BIM Uses. Rapport technique September, Computer integrated construction, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- KREIDER, R. et MESSNER, J. (2015). A model use ontology. In *CIB W78*, Eindhoven, Pays-Bas.
- KRIPHAL, M. et GRILO, A. (2012). Compatibility between design and construction building information models. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*.
- KROB, D. (2009). Éléments d'architecture des systèmes complexes. In *Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques*, pages 179–207. A. Appriou, cnrs editi édition.
- KROB, D. (2014a). Démarche dans l'architecture système. *Process Experience Day, Dassault Systemes, Conférence*.
- KROB, D. (2014b). Éléments de systématique. Architecture des systèmes. In *COLLÈGE DE FRANCE, éditeur : Complexité-Simplicité (en ligne)*. Paris.
- KRUGER, A. et KOLBE, T. H. (2012). Building analysis for urban energy planning using key indicators on virtual 3d city models - the energy atlas of berlin. volume XXXIX, pages 145–150, Melbourne, Australia. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B2, 2012 XXII ISPRS Congress.

- KUBICKI, S. (2006). *Assister la coordination flexible de l'activité de construction de bâtiments. Une approche par les modèles pour la proposition d'outils de visualisation du contexte de coopération*. Thèse de doctorat, Henri Poincaré, Nancy I.
- KVAN, T. (2000). Collaborative design : what is it ? *Automation in Construction*, 9 :409–415.
- LAPLANCHE, F. (2002). Conception de projet SIG avec UML. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 42 :19–25.
- LARRIVÉE, S., BÉDARD, Y. et POULIOT, J. (2006). Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D. *Revue Internationale de Géomatique*, VOL 16/1 :9–27.
- LEAL, D. (2005). ISO 15 926 : Life cycle data for process plant : an overview. *Oil & Gas Science and Technology*, 60(4) :629–637.
- LEE, S.-H. et KIM, B.-G. (2011). IFC Extension for Road Structures and Digital Modeling. *In The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, volume 14. Elsevier B.V.
- LEITE, F., AKCAMETE, A., AKINCI, B., ATASOY, G. et KIZILTAS, S. (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*, 20 :601–609.
- LHOMME, S. (2012). *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- LHOMME, S., SERRE, D., DIAB, Y. et LAGANIER, R. (2010). Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine. pages 487–502.
- LIBOUREL, T. (2002). UML et conception de base de données. page 11.
- LOWNER, M.-o., BENNER, J., GROGER, G. et HAFELE, K.-H. (2013). New Concepts for Structuring 3D City Models – an Extended Level of Detail Concept for CityGML Buildings. pages 466–480. Heidelberg, springer édition.
- LUEBKE, D., REDDY, M., COHEN, J. D., VARSHNEY, A. et WATSON, BENJAMIN HUEBNER, R. (2002). *Level of Detail for 3D Graphic*.
- LUZEAUX, D. et RUAULT, J.-R. (2013). *L'ingénierie système. 100 questions pour comprendre et agir*. Afnor édition.
- LYNCH, K. (1960). *The image of the city*. Mit press édition.
- MACHL, T. (2013). Minutes of the International OGC, SIG 3D and TUM Workshop on Requirements for CityGML 3.0. Rapport technique, CityGML, SIG3D, OGC, TUM, Munchen, Germany.
- MANGIN, D. (2004). *La ville franchisée : Formes et structures de la ville contemporaine*. Paris, France, de la vill édition.
- MANGIN, J.-C., MORAND, D. et SAUCE, G. (1993). De la conception du projet à la gestion de chantier : analyse et spécification d'un système intégré. pages 1–13.
- MANZIONE, L. (2013). *Proposition for a Collaborative Design Process Management Conceptual Structure using BIM*. Thèse de doctorat, Universidade de Sao Paulo, Polytechnic School.
- MARIN, P. et ANTONIO, J. (2014). Outils, méthodes et acteurs : analyse des limites à l'utilisation de la maquette numérique. *In SCAN'14 Séminaire de conception architecturale numérique, Interaction(s) des maquettes numériques*, Luxembourg.
- MATTESSICH, P. W., MURRAY-CLOSE, M. et MONSEY, B. R. (2001). *Collaboration - What makes it work*. Wilder Research Center.

- MEDIACONSTRUCT (2016). Mediaconstruct, chapitre francophone de buildingSMART.
- MERRIEN, F. et LEOBET, M. (2011). La directive Inspire pour les neophytes. Rapport technique, Mission de l'information géographique (MIG), Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- MESSNER, J., ANUMBA, C., LEICHT, R., KREIDER, R., NULTON, E., RAMESH, A., WEIGER, D. et PRICE, K. (2013). BIM planning guide for facility owners. Computer Integrated Construction Research Program. Rapport technique, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- MÉTRAL, C., FALQUET, G. et VONLANTHEN, M. (2013). An ontology-based model for urban planning communication. *In Ontologies for urban development*, pages 61–72. Springer édition.
- MICAELLI, J.-P., BONJOUR, E., DENIAUD, S. et LOISE, D. (2011). L'ingénierie système fondée sur les modèles. *In L'HARMATTAN, éditeur : Modélisation et activités des ingénieurs*, chapitre 5.
- MIGNARD, C. (2012). *SIGA3D : Modélisation, Échange et Visualisation d'Objets 3D du Bâtiment et d'Objets Urbains Géoréférencés ; Application aux IFC pour la Gestion Technique de Patrimoine Immobilier et Urbain*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.
- MINnD (2012). Étude de faisabilité du projet national MINnD Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables. Rapport technique.
- MINnD (2014). Projet National MINnD : Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables. Rapport technique, IREX.
- MINnD UC-3 (2016). State of the Art and Missing Concepts, Data Dictionary, Lifecycle view IDM (Information Delivery Manual). *In Livrables MINnD UC 3*.
- MINnD UC 6-1 (2016). Infrastructures et bruit. *In Livrable MINnD UC 6*.
- MIRALLES, A. (2008). *Ingénierie des modèles pour les applications environnementales*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- MOINE, A. (2006). Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. *L'espace géographique*, Tome 35 :115–132.
- MONTENEGRO, N. C. et DUARTE, J. P. (2009). Computational Ontology of Urban Design, Towards a City Information Model. *In eCAADe 27*, pages 253–260, Istanbul, Turkey.
- MORAND, D. (1994). *Liaison entre la conception et la gestion de projet de bâtiments : PROJECTOR , un prototype pour la planification*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- MORLEY, C., HUGUES, J. et LEBLANC, B. (2008). *UML 2 Pour l'analyse d'un système d'information*. Paris, France, dunod édition.
- MTIBAA, A. et JAZIRI, W. (2007). Ontologie de multi-représentation comme vue utilisateur pour la spécification des besoins multi-contexte. *In Journée francophone sur les ontologies (JFO07)*, page 17, Sousse, Tunisie.
- NAGEL, C., STADLER, A. et KOLBE, T. H. (2009). Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3d models.
- NF ISO 10006 (1998). Management de la qualité : Lignes directrices pour la qualité en management de projet. Rapport technique, AFNOR, ISSN 0335-122-6.
- NGUYEN, V. T. (2006). Ingénierie système appliquée à la gestion des données techniques en entreprise étendue : Application aux boucles de conception / simulation. *Ecole Centrale Paris*.
- NORME DE CITYGML (2012). Open Geospatial Consortium OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding standard. Rapport technique.

- NUGROHO, A. (2009). Level of detail in UML models and its impact on model comprehension : A controlled experiment. *In Information and Software Technology*, volume 51, pages 1670–1685. Elsevier B.V.
- ONBERGRIESSER, M. et BORRMANN, A. (2012). Infrastructural BIM standards – Development of an Information Delivery Manual for the geotechnical infrastructural design and analysis process. *In eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, chapitre BIM in inf, pages 581 – 587. London, taylor & f édition.
- ONBERGRIESSER, M., EURINGER, T., BORRMANN, A. et RANK, E. (2011). Integration of geotechnical design and analysis processes using a parametric and 3D-model based approach. *Computing in civil engineering*, pages 430–437.
- OBJECT MANAGEMENT GROUP (2011). Business Process Model and Notation (BPMN). Rapport technique Version 2.0, OMG : Object Management Group.
- OHORI, K. A., LEDOUX, H., BILJECKI, F. et STOTER, J. (2015). Modeling a 3D City Model and its Levels of Detail as a true 4D Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 :1055–1075.
- OMG (2011). OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure. Rapport technique August, Object Management Group.
- OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (2011). OGC Reference Model.
- PARENT, C., SPACCAPIETRA, S. et ZIMANYI, E. (2006). The MurMur project : Modeling and querying multi-representation spatio-temporal databases. *Information Systems*, 31(8) :733–769.
- PARENT, C., SPACCAPIETRA, S., ZIMANYI, E., DONINI, P., PLAZANET, C., VANGENOT, C., ROGNON, N. et CRAUSAZ, P.-A. (1997). MADS, modèle conceptuel spatio-temporel. *Revue Internationale de Géomatique*, 7(num. 3-4) :317–352.
- PARFOURU, S. (2004). Rapport de DEA : Modélisation et utilisation du contexte application à la gestion de crise. Rapport technique.
- PARFOURU, S. (2008). *Approche méthodologique et instrumentale de construction et de restitution de documents structurés*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes.
- PAS 1192-2 (2013). Specification for information management for the capital / delivery phase of construction projects using building information modelling. Rapport technique, british standard institution.
- PENN STATE (2011). Building Information Modeling Project Execution Planning Guide. Rapport technique, Pennsylvania State University.
- PFEFFERKORN, C. (1972). The design problem solver : a system for designing equipment or furnitures layouts. Rapport technique, DTIC Document, Londres.
- PICON, A. (2013). *Smart Cities, Théorie et critique d'un idéal auto-réalisateur*. B2 édition.
- PICTOGRAF (2016). PictograF.
- PIZKA, M. et BAUER, A. (2004). A brief top-down and bottom-up philosophy on software evolution. *In Proceedings of the International Workshop on Principles of Software Evolution (IWPSE)*, Kyoto. IEEE Computer society.
- PLUME, J. et MITCHELL, J. (2007). Collaborative design using a shared IFC building model — Learning from experience. *Automation in Construction*, 16 :28–36.
- PLUME, J. et MITCHELL, J. (2011). An urban information framework to support planning decision-making and urban design. *In 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design*, pages 653–666. In Pierre Leclereq, Ann Heylighen & Geneviève Martin (eds) Designing Together CAAD Futures, University of Liège, Belgium.

- POYET, P. et MONCEYRON, J. (1997). Les classes d'objets IFCs. Finalité et mode d'emploi. Rapport technique, Rapport technique, CSTB.
- PRÉLAZ-DROUX, R. (1995). *Système d'information et gestion du territoire*. Presses po édition.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (2008). *Project Management Body of Knowledge*. Procest ma édition.
- QUÉBEC (2014). Vocabulaire de la géomatique. Rapport technique 7, Gouvernement du Québec.
- RINALDI, B. S. M., PEERENBOOM, J. P. et KELLY, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine [En ligne]*, Vol. 21, n.
- ROCHET, C. et PEIGNOT, J. (2013). De la gestion des villes à la conception d'écosystèmes urbains durables. *In MED6*, Marseille, France.
- ROCHET, S. (2007). *Formalisation des Processus de l'Ingénierie Système Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- ROQUES, P. (2014). UML : limites et critiques. *Génie Logiciel*, 111 :19–24.
- ROSSIGNAC, J. (2005). Shape complexity. *In The Visual Computer*, volume 21, pages 985–996.
- ROUSSEL, A., JOUZEAU, A. et DEFRANCE, R. (2014). Application du standard STEP à l'ingénierie d'un système de simulation. *Génie Logiciel*, n°108 :2–14.
- RUAS, A. (1999). Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- RUAS, A. (2004). *Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Marne la Vallée.
- SACKS, R., KANER, I., EASTMAN, C. M. et JEONG, Y.-S. (2010). The Rosewood experiment — Building information modeling and interoperability for architectural precast facades. *In Automation in Construction*, volume 19, pages 419–432. Elsevier B.V.
- SANG-HO, L. et YEON-SUK, J. (2006). A system integration framework through development of ISO 10303-based product model for steel bridges. *Automation in Construction*, pages 212–228.
- SANNIER, N. et BAUDRY, B. (2011). Défis pour la variabilité et la traçabilité des exigences en ingénierie système. *In INFORSID 2011*, Lille, France.
- SETRA (1988). Circulaire n88-49 Partie 3 : dispositifs latéraux en béton. Rapport technique, Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports.
- SÉTRA (2008). Application des Eurocodes par le Maître d'Ouvrage. Rapport technique, Guide technique.
- SEVANICHE, A. et BRESSON, J. (2014). Maquette numérique et gestion patrimoniale. Rapport technique, Caisse des dépôts.
- SIMON, H. (1982). *The sciences of the artificial*. The MIT Press, Cambridge.
- SMITH, M. et TOCKEY, S. (1988). *An integrated approach of software requirements definition using objects*. Seattle, boeing com édition.
- STADLER, A. et KOLBE, T. H. (2007). Spatio semantic coherence in the integration of 3D city models. *In International Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ*, Enschede.
- STOCK, K., STOJANOVIC, T., REITSMA, F., OU, Y., BISHR, M., ORTMANN, J. et ROBERTSON, A. (2012). To ontologise or not to ontologise : An information model for a geospatial knowledge infrastructure. *Computers and Geosciences*, 45 :98–108.

- TACNET, J.-M., BATTON-HUBERT, M., DEZERT, J. et RICHARD, D. (2012). Decision support tools for natural hazards management under uncertainty. New approaches based on multicriteria decision analysis and evidential reasoning. *In 12th Congress INTERPRAEVENT*, pages 597–608, Grenoble, France.
- TAMMINGA, G., van den BRINK, L., van LINT, H., STOTER, J. et HOOGENDOORN, S. (2013). Towards GIS compliant data structures for traffic and transportation models. *In Transportation research board 92nd annual meeting. Transportation data interoperability : Recent research*, Washington, DC, USA.
- TELLER, J., LEE, J. et ROUSSEY, C. . (2013). *Ontologies for Urban Development*.
- TEULIER, R., CHARLET, J. et TCHOUNIKINE, P. (2005). *Ingénierie des connaissances*. L'harmatta édition.
- THIBAUT, S. (2000). Le génie urbain. *In La ville et l'urbain, l'état des savoirs*, pages 244–254. La découverte édition.
- THIERRY, P. (1999). *Le risque, frontière du génie urbain, Identification et organisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision dans les réseaux techniques urbains (eau potable et assainissement)*. Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- TOUBIN, M. (2014). *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif. L'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation*. Thèse de doctorat, Université Paris Diderot.
- TOUBIN, M., SERRE, D., DIAB, Y. et LAGANIER, R. (2012). A collaborative approach from resilient networks to resilient cities. *In 27th International Conference on Water Sensitive Urban Design*, Melbourne, Australie.
- VOLK, R., STENGEL, J. et SCHULTMANN, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38 :109–127.
- VON BOTH, P. (2012). Potentials and barriers for implementing BIM in the German AEC market : Results of a current market analysis. *In Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, volume 2, pages 141–148, Prague (Czech Republic).
- WCGRAW HILL CONSTRUCTION (2012). The Business Value of BIM for Infrastructure. *SmartMarket Report*.
- WILSON, T. D. (2002). The nonsense of "knowledge management". *Information research*, 8(paper no. 144).
- YABUKI, N. (2009). Representation of caves in a shield tunnel product model. *In Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction*, pages 545–550.
- YABUKI, N. et LI, Z. (2006). Development of new IFC-BRIDGE data model and a concrete bridge design system using multi-agents. *In Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2006*, pages 1259–1266. Springer Berlin Heidelberg.
- ZIGNALE, D. (2013). *Concevoir des services collaboratifs adaptés à des pratiques métiers : une méthode centrée usages. Application au domaine de la construction*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- ZOGLAMI, A. (2013). *Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision*. Thèse de doctorat, Université Paris 8.

Glossaire

Acronymes récurrents

ADE : Application Domain Extensions : compléments aux standards CityGML pour des extensions métier (voir section [A.2.2](#) en Annexe A).

AFIS : Association Française d'Ingénierie Système

AFNOR : Association Française de Normalisation

AVP (phase) : phase d'Avant Projet

BE : Bureau d'Etudes

BEP : BIM Execution Plan : décrit les éléments de mise en place du BIM sur le projet.

BIM : Building Information Modeling

BS : British Standard (standard pour l'application du BIM produit par la BSI)

BSI : British Standard Institution (parfois écrit « bsi »)

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CEN : Comité Européen de Normalisation

EXE (phase) : phase d'exécution

GED : Gestion Électronique de Documents

GML : Geography Markup Language

IDM : Information Delivery Manual

IFC : Industry Foundation Classes

IFD : International Framework for Dictionaries

ISBM : Ingénierie Système Basée sur les Modèles (ou Model Based System Engineering).

ISO : International Organization for Standardization

ITPC : Interrupteur de Terreplein Central

LOA : Level Of Abstraction

LOD : Level Of Detail (Normalisé par la [[Norme de CityGML, 2012](#)])

LoD : Level of Detail ou Level of Development (pour la conception)

LODef : Level Of Definition

LODt : Level Of Development

LOI : Level Of Information

LOXi : concept comprenant l'ensemble des niveaux de notre proposition : LOD, LOI, LOA.

- MADS** : Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles. Modèle conceptuel développé suite au constat que les modèles conceptuels spatio-temporels de l'époque ne répondaient pas de manière satisfaisante aux besoins [Parent *et al.*, 1997]. Compléments en Annexe D.
- MBSE** : Model Based System Engineering (Ingénierie Système Dirigée par les Modèles)
- MCD** : Modèle Conceptuel de Données
- MDE** : Model-Driven Engineering (Ingénierie Dirigée par les Modèles)
- MN** : Maquette Numérique
- MVD** : Model View Definition
- OGC** : Open Geospatial Consortium (pus de détails en section 1.2.3 page 35).
- PAS** : Publicly Available Specifications
- PLCS** : Product LifeCycle Support
- PM** : Process Map
- PMP** : Plan de Management de Projet : document ou ensemble de documents qui décrivent comment le projet sera réa- lisé, suivi et piloté (ISO 21500) [AFITEP, 2010].
- PPP** : Partenariat Public Privé
- PRO (phase)** : phase de projet
- SI** : Système d'information
- UML** : Unified Model Language
- VRD** : Voirie et Réseaux Divers

Éléments de définition

- Acteur** : est une personne physique ou un système distant qui interagit avec le système étudié pour atteindre un but précis [Badreau et Boulanger, 2014].
- Besoin** : est une nécessité, un désir, un manque ou une insatisfaction éprouvé par un utilisateur [Badreau et Boulanger, 2014].
- CadnaA** : solution logicielle pour le calcul, l'évaluation, la prévision et la présentation de l'exposition acoustique et de l'impact des polluants dans l'air.
- Clash** : Un clash est souvent considéré comme une interaction volumique entre deux objets. Il existe d'autres types de clashes : une non continuité, physique ou topologie, ou une distance minimale non respectée entre deux objets sont également des clashes.
- Exigence** : est un énoncé qui traduit un besoin ou des contraintes (techniques, coût, délais, etc.). Cet énoncé est rédigé dans un langage qui peut être naturel, mathématique, etc. (définition AFIS).
- Méta-donnée** : les méta-données rassemblent toutes les informations que l'on peut recueillir et mettre à disposition pour décrire cette ressource [Ferriès et Légise, 2006].
- Méta-donnée** : informations décrivant les données, afin de faciliter leur inventaire, leur recherche et leur utilisation. Par exemple thèmes auxquels appartiennent ces données, mots-clés, situation géographique, date, qualité et validité, conformité aux règlements européens relatifs à l'interopérabilité, conditions d'utilisation, autorités publiques responsables, restrictions éventuelles, etc.) [Merrien et Leobet, 2011].
- Objet_I** : un `Objet_I` correspond à n'importe quelle classe d'objet qui :
- participe à la modélisation de l'infrastructure,
 - est une classe concrète,

– possède une existence spatiale.

Puisqu'il s'agit d'un nom de classe, nous ne distinguons pas le pluriel de ce nom et pouvons donc écrire « Des Objet_I » .

Ontologie : On peut caractériser une ontologie comme une structuration des concepts d'un domaine. Ces concepts sont rassemblés pour fournir les briques élémentaires et exprimer les connaissances dont on dispose dans ce domaine [Bachimont, 2006].

Partie prenante : personne physique ou morale qui a un intérêt direct ou indirect dans le projet [Badreau et Boulanger, 2014].

PERCEPTORY : solution pour modéliser conceptuellement une base de données géospatiales pour des fins d'application 3D : concepts théoriques, extension 3D pour l'UML et intégration de pictogrammes spatiaux et spatio-temporels [Larrivée et al., 2006]. Compléments section 3.8 page 77.

Processus : On appelle *processus* l'organisation d'un ensemble finalisé d'activités effectuées par des acteurs et mettant en jeu des entités, pour répondre à un type d'évènement [Morley et al., 2008].

Processus : Ensemble des moyens et d'activités liés qui transforment des éléments entrants en éléments sortants. Les moyens peuvent comprendre le management, les services, le personnel, les finances, les infrastructures, les équipements, les techniques et les méthodes. Les processus du projet comprennent les processus du management de projet [NF ISO 10006, 1998]. Donc le BIM peut effectivement être qualifié de processus.

Projet : Dans le cadre de l'ingénierie système : La définition donnée par l'ISO 9000-205 est : processus unique qui consiste en un assemblage d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coût et de ressources. De l'idée à la livraison ou en PPP de l'idée à la passation des droits d'exploitation.

Prototype : Objet destiné à vérifier la faisabilité d'une solution sous un aspect particulier [Badreau et Boulanger, 2014].

Système : un système est un ensemble de composants matériels, logiciels et humains qui coopèrent d'une manière organisée, dans un but d'atteindre un objectif commun [Badreau et Boulanger, 2014].

Description d'Objet_I techniques et commentaires en lien avec l'audit de sécurité

Atténuateur de chocs : voir pour illustration la Figure 8.11.

Balises : la précision de l'implantation est croissante avec l'avancée de la conception (voir Figure 8.12).

Dispositifs de retenue : la contrainte des dispositifs de retenue est à examiner en détails lors des phases de PRO pour assurer leur faisabilité en cas d'épaulement à des ouvrages existants par exemple (voir Figure 8.13).

Gabarit : les gabarits horizontaux et verticaux peuvent être vérifiés automatiquement dans la MN grâce à la structuration des objets en groupes.

Murs anti-recyclage : certaines tranchées existantes sont équipées de murs anti-recyclage, d'autres non. Au stade APA, leur présence ou non n'est pas définitive. En phase PRO, le concepteur devra s'assurer que la présence de murs anti-recyclage ne vient pas réduire les conditions de visibilité sur la section courante (en particulier sur la voie rapide en courbe à gauche). En effet, certaines tranchées très anciennes n'ont pas été dimensionnées avec la réglementation actuelle. De même, il sera à vérifier que les conditions de visibilité ne soient pas dégradées au droit des ITPC si ces derniers venaient à évoluer (voir Figure 8.14).

Niches de secours : certaines niches sont existantes, d'autres sont à créer. Ces niches peuvent constituer des obstacles latéraux ; leur isolement est donc à étudier. De plus, l'accès aux niches est à regarder avec attention. Il convient que le niveau du radier de la niche soit proche du niveau du trottoir. La réalisation d'escaliers d'accès constituerait un obstacle latéral agressif et réduirait la facilité d'accès aux niches (personnes à mobilité réduite).

Piles d'ouvrages d'art : les piles des ouvrages d'art doivent être considérées comme des obstacles latéraux à protéger, dès lors qu'ils sont dans la zone de sécurité, ce qui est majoritairement le cas pour la L2. Les piles existantes doivent être vérifiées comme dimensionnées au choc poids-lourds.

SAV : voir pour illustration la Figure 8.15.



FIG. 8.11 – Exemple de modélisation d'un atténuateur de chocs.



FIG. 8.12 – Exemple de modélisation d'une balise J14.



FIG. 8.13 – Exemple de modélisation d'un dispositif de retenue.



FIG. 8.14 – Exemple de modélisation d'un mur anti-recyclage.



FIG. 8.15 – Exemple de modélisation d'SAV.

ANNEXES



Éléments de définition des standards IFC et CityGML

A.1 Les Industry Foundation Classes (IFC)

D'après [Obergiesser et Borrmann, 2012], au début de la CAO, les tentatives d'interopérabilité entre les différents processus de conception ont souvent échoué du fait de l'absence de formats standardisés pour échanger les données de construction (géométriques et sémantiques) pendant le cycle de vie complet du bâtiment conçu. Pour cette raison, le format IFC a été lancé par l'Alliance Internationale pour l'Interopérabilité (IAI) en 1994.

Le standard des IFC (Industry Foundation Classes) (norme ISO 16739) est un modèle de données ouvert et standardisé pour l'échange de données au sein du BIM [au départ pour les projets de bâtiment] [BuildingSMART, 2016]. Ce standard est né de l'initiative de l'IAI, renommée depuis BuildingSMART, associant des entreprises du secteur de la construction et des éditeurs de logiciels. Cette organisation, qui rédige l'ensemble des IFC, est divisée en chapitres nationaux dont Mediaconstruct est le représentant français. Elle a pour objectif principal de favoriser l'interopérabilité des logiciels dans le secteur de la construction [Arthaud, 2007]. La première version IFC 1.0 a été créée en janvier 1997 et couvre les domaines suivants : la conception architecturale, le génie climatique, la maîtrise d'œuvre et la gestion de patrimoine [Poyet et Monceyron, 1997]. Nous en sommes maintenant à la version 4, normalisée en mars 2013 [BuildingSMART, 2013]. [Arthaud, 2007] décrit les IFC de la manière suivante : « Ils représentent une alternative stable, pérenne et normalisée aux formats DXF/DWG qu'utilisent les logiciels commerciaux actuels. Il s'agit d'une approche orientée objets de construction. Elle englobe non seulement les composants tangibles comme les portes, les murs, les ventilateurs, etc. mais aussi les concepts abstraits comme les espaces, l'organisation, les processus, etc. ». Ils restent cependant cantonnés à la description des bâtiments, d'où l'extension IFC *Bridge*, *Alignment* ou *Road* évoqués en section 1.2.3 page 33, en cours de rédaction, devant permettre les échanges de données de conception pour les ouvrages d'art et les infrastructures. Rappelons que l'idée d'arriver à un standard commun d'échange était déjà présente bien avant la normalisation des IFC [Groupe Structuration de Données, 1991 ; Morand, 1994]. Pour plus d'informations sur les IFC on peut notamment se référer au travail d'Arthaud [2007].

A.1.1 Observations sur les IFC

Les IFC sont dédiées à des échanges de données en projet de conception, ce qui correspond à notre contexte de travail. Toutefois, nous formulons quelques observations.

Tout d'abord, par rapport à notre sujet d'étude, les infrastructures urbaines, les IFC ne permettent pas pour le moment la modélisation des entités relatives à l'aménagement urbain ou à l'aménagement du territoire [BuildingSMART, 2013]. Le modèle conceptuel des IFC ne contient pas les concepts spatiaux

[et donc les objets] tels que les rues, la végétation ou les plans d'eau Kolbe *et al.* [2005] : les IFC ne sont donc pas appropriés pour la représentation des modèles de ville [ou d'infrastructures qui s'insèrent dans un environnement existant]. Il ne le sont pas non plus pour la modélisation de la réalisation des travaux : ils sont actuellement centrés sur la conception.

D'un point de vue plus technique, nous relevons que d'après l'enquête conduite par l'Institut de Technologie de Karlsruhe qui portait sur les potentiels et les barrières associées à l'implémentation du BIM sur le marché allemand [von Both, 2012], il apparaît certaines limites techniques associées à l'état de développement du format IFC. Cela concerne principalement les exports et imports au format IFC qui peuvent engendrer des erreurs ou des pertes sémantiques ou attributaires [Marin et Antonio, 2014]. Il existe également des incompatibilités entre plusieurs vues métier portées sur un même objet : tous les acteurs de la construction ne définissent pas un mur de la même manière par exemple ou une ouverture de porte (ouverture réelle physique, ouverture disponible pour personne à mobilité réduite, etc.). Ces questions sont à traiter avec les dictionnaires d'objets (le bsDD (buildingSMART Data Dictionary) par exemple) et de propriétés (projet de normalisation PPBIM par exemple) ou avec les ontologies. En lien avec les IFC, des outils de définition des parties d'un modèle (les objets mais également les informations attributaires et sémantique) à échanger existent mais ils ne sont pas normalisés, ce qui freine l'efficacité des échanges en IFC. Notre proposition de modèle conceptuel vise en partie à répondre à ce type de problématique. Nous détaillons cela dans notre deuxième partie.

A.2 Le standard CityGML

A.2.1 Définition de CityGML

Les informations de ce paragraphe sont extraites de [Emgard et Zlatanova, 2008 ; Groger et Plumer, 2012]. Le langage de CityGML a été développé depuis 2002 par les membres du *Special Interest Group 3D* (SIG 3D)¹ sur initiative de *Geodata Infrastructure North Rhine-Westphalia* (GDI NRW). Ce groupe *SIG 3D* est actuellement [en 2008] composé de plus de 70 entreprises, collectivités et organismes de recherche en Allemagne, Grande Bretagne, Suisse ou Autriche qui travaillent au développement et à l'exploitation commerciale de modèles 3D interopérables et de solutions de géovisualisation. CityGML est un modèle d'information général pour la représentation d'objets urbains 3D. Il définit les classes et les relations pour les objets les plus pertinentes pour les modèles de villes et les modèles régionaux en respectant leurs propriétés géométrique, topologiques, sémantique et leur apparence. Le concept de « ville » est ici définie au sens large en comprenant non seulement les structures construites, mais également la végétation, les éléments hydrographiques, le mobilier ou équipements urbains, et plus encore [plus de détails sont donnés ci-dessous]. Les hiérarchies de généralisation entre les classes thématiques ainsi que les agrégations, les relations entre les objets et les propriétés spatiale sont également incluses dans les modèles de CityGML. Ces informations thématiques vont au-delà des formats d'échanges graphiques et permettent d'employer des modèles virtuels de ville en 3D pour des tâches d'analyse sophistiqués dans les différents domaines d'application tels que les simulations, l'exploration de données urbaine, la gestion des installations et des enquêtes thématiques [nous verrons plus bas que pour faciliter ce types d'analyses CityGML doit encore évoluer]².

CityGML est un modèle de donnée basé sur le format XML pour le stockage et l'échange de modèles virtuels 3D urbains. Il s'agit d'un schéma d'application pour la version 3.1.1 du Geography Markup Language (GML3), norme internationale, publié par l'Open Geospatial Consortium (OGC) et l'ISO TC211, pour l'échange extensible de données spatiales. L'objectif du développement de CityGML est de parvenir à une définition commune des entités de base, des attributs et des relations d'un modèle de ville en 3D. Ceci est particulièrement important en ce qui concerne le maintien dans le temps des

1. <http://www.sig3d.org/>

2. http://www.citygmlwiki.org/index.php/Basic_Information

modèles de villes en 3D, ce qui permet la réutilisation des mêmes données dans différents domaines d'application³.

Le CityGML est en passe de devenir le premier format d'échange standard de modèles 3D urbains. Le monde de l'information géographique comble ainsi son retard en la matière sur les standards info-graphiques 3D ainsi que sur ceux mis en place dans le monde de la construction [Billen *et al.*, 2008]. Il s'agit du seul format interopérable libre de modélisation du milieu urbain avec un champs d'applications aussi large et complet [Groger et Plumer, 2012]. CityGML est un profil de GML3, qui met en œuvre un modèle de ville en 3D interopérables, multi-fonctionnel, multi-échelle et sémantique [Kolbe *et al.*, 2005].

Dans son document de normalisation, CityGML est spécifié en utilisant le langage de modélisation graphique unifiée Unified Modeling Language (UML). À partir de diagrammes UML, les schémas XML sont calculées en appliquant les règles de transformation. Ainsi, CityGML peut être traitée par des lecteurs standards de GML3 [Kolbe *et al.*, 2005].

A.2.2 Utilisation de CityGML

D'après Kruger et Kolbe [2012], la Norme de CityGML [2012] spécifie les classes et les relations des objets de la ville les plus pertinents avec une modélisation orientée objet. Ce modèle de données permet de décrire les relations géométriques et topologiques, les propriétés sémantiques ainsi que l'apparence, la généralisation et l'agrégation entre les classes d'objets ainsi que les relations thématiques entre les objets du milieu urbain. CityGML couvre les objets thématiques qui sont pertinentes pour les modèles de la ville, y compris les objets de transport tels que les rues ou les feux de signalisation, ou des objets de couverture végétale [Kolbe *et al.*, 2005]. Il couvre également les champs de modules thématiques pour la représentation des bâtiments, du mobilier urbain, de l'occupation des sols, du relief et de la végétation, des infrastructures de transport et des voies navigables [Kruger et Kolbe, 2012]. Pour résumer, voici les champs thématiques supportés par le modèle conceptuel de CityGML (extrait de [Norme de CityGML, 2012]) :

- Appearance ;
- Bridge ;
- Building ;
- CityFurniture ;
- CityObjectGroup ;
- Generics ;
- LandUse ;
- Relief ;
- Transportation ;
- Tunnel ;
- Vegetation ;
- WaterBody ;
- TexturedSurface.

Pour Emgard et Zlatanova [2008], CityGML ne représente pas seulement l'aspect graphique des modèles urbain 3D. Ce standard permet également de considérer l'aspect sémantique, de gérer des propriétés thématiques, des taxonomies et des agrégations de modèles numériques de terrain, de sites (de type bâtiments, pont, tunnel), de végétation, de plans d'eau, d'installations de transport et de mobilier urbain comme nous cela a été évoqué ci-dessus. Suite à l'analyse de la norme de CityGML, nous pouvons ajouter qu'un important principe de CityGML consiste en la conservation de la cohérence entre la modélisation et les propriétés sémantique ou topologiques. Ainsi, le modèles est composé de deux hiérarchies : sémantique et géométrique dans laquelle les objets sont liés par des relations [Stadler

3. *ibidem*

et Kolbe, 2007]. Cette approche permet de naviguer entre les deux hiérarchies afin de mieux répondre aux requêtes faite sur le modèle décrit en CityGML. La cohérence entre ces deux hiérarchies n'est pas décrite formellement dans la norme. Nous parlons plus en détail de ce point (les LOD, Level Of Detail) à partir de la section 5.1 page 107.

Du point de vue de la diffusion et de l'utilisation de CityGML, d'après Lowner *et al.* [2013], ce standard est communément admis et utilisé dans le domaine des modèles de villes en 3D. Le nombre de modèles de villes disponibles et leurs applications a considérablement augmenté au cours des dix dernières années. Les applications qui reposent sur CityGML sont par exemple « l'Atlas Energy » de Berlin qui prend en charge des enquêtes sur la consommation d'énergie, l'estimation des consommations énergétiques des villes pour des croisements avec d'autres indicateurs [Kruger et Kolbe, 2012; Bahu *et al.*, 2013] et les potentiels d'économie d'énergie [Kruger et Kolbe, 2012] avec prise en compte du potentiel d'ensoleillement [Machl, 2013; Brasebin, 2014]. On retient également des utilisations pour des simulation de propagation du bruit, des simulations d'impact environnementale comme des analyses aérauliques [Billen *et al.*, 2014], étude de l'impact de construction sur la végétation [Norme de CityGML, 2012], participation citoyenne, rénovation urbaine [Groger et Plumer, 2012] ou pour la protection et la gestion du milieu urbain en cas de catastrophe [Lowner *et al.*, 2013; Billen *et al.*, 2014].

Un concept fondamental de CityGML, le « Level Of Detail » (ou LOD) ne sera pas traité dans cette partie. Une description ainsi qu'une analyse approfondie en sont faites en partie 5.1 page 107.

Villes partageant des modèles en CityGML

La lecture de cette partie nécessite la compréhension du concept de LOD décrit en section 5.1 page 107.

D'après Groger et Plumer [2012], de nombreux modèles de villes en 3D existent et sont échangés en CityGML. En Allemagne, la quasi-totalité des grandes municipalités fournissent des modèles au LOD2 (voir définition des LOD en partie 5.1 page 107) de tous leur territoire avec au moins pour leurs centres-villes une modélisation au LOD3 avec des textures. Les exemples les plus connus sont Berlin (d'après Kruger et Kolbe [2012], le modèle 3D officielle de la ville de Berlin se compose d'environ 550 000 bâtiments au LOD2, environ 100 bâtiments (les sites et points d'intérêt) en LOD3, et 4 bâtiments au LDO4 avec intégration du Modèle Numérique de Terrain. Ce modèle structuré selon la norme CityGML fournit la géométrie, la topologie, la sémantique, et l'apparence d'une manière intégrée pour tous les bâtiments à Berlin [à des LOD différents]), Cologne, Dresde, Düsseldorf et Munich. Ensuite, la plupart des États fédéraux ont déjà recueilli des données au LOD1 (Rhénanie-du-Nord-Westphalie, Bavière, Schleswig-Holstein, Brandebourg, par exemple) ou avaient l'intention à l'époque (2012) de fournir des données au LOD1 en 2013. Le modèle au LOD1 de Rhénanie du Nord Westphalie, par exemple, contient environ 7 million de bâtiments qui sont fournis par l'intermédiaire d'un service web. Ces données ont été utilisés pour la simulation de la propagation du bruit et comme entrée pour OpenStreetMap 3D. La majorité des États allemands visent à fournir du LOD2 pour 2016 [Groger et Plumer, 2012]. Nous n'avons pas d'informations complémentaires sur le contenu de ces modèles souhaités mais il semble que la majorité des objets qui seront contenus seront des bâtiments. Il pourrait également être pertinent de disposer des éléments de transports par exemple également en LOD2, à partir du moment où cela ne fait pas doublon avec la directive INSPIRE ⁴

Ensuite, Groger et Plumer [2012] recensent dans leur travail les informations suivantes : CityGML joue également un rôle important dans le projet pilote de création d'une norme de l'information géographique 3D pour les Pays-Bas dans : la future norme nationale 2D/3D sera mis en œuvre comme une

4. CityGML a influencé le modèle de la directive INSPIRE de la commission européenne qui vise à la création d'une infrastructure de données spatiales européennes pour le secteur public, et ce, de manière interopérable [Groger et Plumer, 2012].

extension (*Application Domain Extension* ou ADE, voir A.2.2) pour CityGML. De nombreuses villes en Europe tels que Monaco, Genève, Zurich, et Leeuwarden utilisent CityGML avec des LOD2 ou 3 pour représenter et échanger des données, ainsi que les villes au Danemark (LOD2 et 3 également, avec une partie en LDO4) [Groger et Plumer, 2012]. Pour Groger et Plumer [2012], à l'avenir, la directive INSPIRE et les rôle important que joue CityGML se traduira par une utilisation croissante de CityGML en Europe. Concernant le reste du monde il existe d'autres modèles de villes en CityGML : il existe des modèles d'Istanbul au LOD1 et 2, de Doha au Katar au LOD3 et de Yokohama au Japon en LOD2. CityGML joue également un rôle crucial pour l'infrastructure de données spatiales 3D en Malaisie [Groger et Plumer, 2012].

Enfin, Groger et Plumer [2012] indiquent qu'en France, le projet Bâti3D (Institut Géographique National français, IGN) définit un profil de CityGML en LOD2 et fournit des données de Paris et les centres-villes d'Aix-en-Provence, de Lille, Nantes et Marseille. Pour compléter, nous pouvons évoquer les villes de Bordeaux⁵ ou de Lyon⁶ qui maintiennent un modèle 3D en CityGML, disponible au public, avec un LOD2 et 3 voir 4 pour certains bâtiments particuliers. D'autres initiatives européennes vont jusqu'à décrire leurs villes au LOD3 ou 4, mais seulement de manière partielle.

Extension de CityGML : les ADE

Une ADE (*Application Domain Extensions*) permet de prolonger d'une manière formalisée le CityGML par des attributs ou des objets spécifiques pour faire face aux exigences thématiques supplémentaires non couvertes par la norme [Kruger et Kolbe, 2012]. Il est ainsi possible d'ajouter des attributs ou relations aux classes existantes et d'ajouter des classes complémentaires. Voici quelques extensions possibles dédiées à l'étude de la propagation du bruit, la gestion de patrimoine ou de réseaux, la gestion des catastrophes, l'étude de la qualité de l'air, l'étude du microclimat, la participation citoyenne etc ; certaines ADE permettent également de faciliter l'intégration de la sémantique et les propriétés des IFC vers CityGML Mignard [2012]. On retrouve également une liste d'ADE disponibles ou en développement sur le site de CityGML <http://www.citygmlwiki.org/index.php/CityGML-ADEs>. Est également cité dans [Groger et Plumer, 2012] une « INSPIRE-ADE », qui était à l'époque (2012) une intention pour faciliter le passage des données entre le modèle de la directive INSPIRE et le modèle de CityGML. Pour Lowner *et al.* [2013], les ADE sont un avantage de CityGML qui permettent son évolutivité pour les besoins de l'utilisateur. La définition des classes et des attributs génériques complémentaire par contre, entrave l'interopérabilité puisqu'il n'existe pas de schéma commun d'extension. A noter pour nuancer cette affirmation que ces nouveaux objets et règles peuvent éventuellement donner lieu à une standardisation dans une communauté d'utilisateurs pour lesquels ces objets sont indispensables.

Compléments pour la définition du concept de Level Of Detail (LOD)

Ces tableaux sont extraits de *Norme de CityGML* [2012]. Ils évoquent différentes règles de répartition des objets dans les LOD pour les modélisations en CityGML.

A.2.3 Observations sur le CityGML

Si les critiques évoquées plus haut sur les IFC sont plutôt d'ordre technique et sommaires, celles portant sur le CityGML seront ici plus fournies et axées sur la structuration du standard. Nous souhaitons tout de même rappeler qu'il ne s'agit pas de choisir le standard le plus performant et d'enterrer le deuxième avec une critique subjective. Nous avons cherché à identifier les éléments intéressants et compatibles du CityGML pour les projets d'infrastructure, tout en sachant qu'il n'est pas au départ conçu pour cette tâche. Les observations sont donc plus fournies pour le CityGML puisque les IFC

5. http://data.bordeaux-metropole.fr/graphic_downloader.php?layer=343&format=76

6. <http://smartdata.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-du-3f-arrondissement-de-lyon/>

TAB. A.1 – Correspondance de thèmes géométriques et sémantiques avec les LOD appliqués à l'objet bâtiment [Norme de CityGML, 2012]

Geometric / semantic theme	Property type	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Building footprint and roof edge	<i>gml:MultiSurfaceType</i>	•				
Volume part of the building shell	<i>gml:SolidType</i>		•	•	•	•
Surface part of the building shell	<i>gml:MultiSurfaceType</i>		•	•	•	•
Terrain intersection curve	<i>gml:MultiCurveType</i>		•	•	•	•
Curve part of the building shell	<i>gml:MultiCurveType</i>			•	•	•
Building parts	<i>BuildingPartType</i>		•	•	•	•
Boundary surfaces (chapter 10.3.3)	<i>AbstractBoundarySurfaceType</i>			•	•	•
Outer building installations (chapter 10.3.2)	<i>BuildingInstallationType</i>			•	•	•
Openings (chapter 10.3.4)	<i>AbstractOpeningType</i>				•	•
Rooms (chapter 10.3.5)	<i>RoomType</i>					•
Interior building installations (chapter 10.3.5)	<i>IntBuildingInstallationType</i>					•

TAB. A.2 – Paramètres pour la répartition des objets par LOD d'après la Norme de CityGML [2012]. Nous avons choisi de conserver ce tableau en anglais afin de ne pas introduire de confusion dans la traduction des termes de la ligne 2 « Model scale description » dont les limites restent floues entre LOD.

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model scale description	regional, landscape	city, region	city, city districts, projects	city districts, architectural models (exterior), landmark	architectural models (interior), landmark
Class of accuracy	lowest	low	middle	high	very high
Absolute 3D point accuracy (position / height)	lower than LOD1	5/5m	2/2m	0.5/0.5m	0.2/0.2m
Generalisation	maximal generalisation	object blocks as generalised features; > 6*6m/3m	objects as generalised features; > 4*4m/2m	object as real features; > 2*2m/1m	constructive elements and openings are represented
Building installations	no	no	yes	representative exterior features	real object form
Roof structure/representation	yes	flat	differentiated roof structures	real object form	real object form
Roof overhanging parts	yes	no	yes, if known	yes	yes
CityFurniture	no	important objects	prototypes, generalized objects	real object form	real object form
SolitaryVegetationObject	no	important objects	prototypes, higher 6m	prototypes, higher 2m	prototypes, real object form
PlantCover	no	>50*50m	>5*5m	< LOD2	<LOD2
...to be continued for the other feature themes					

sont dédiés aux projets de conception et que leur extension pour les projets d'infrastructure sont en développement. Le concept de niveau de détail (LOD) de CityGML est d'un intérêt certain pour notre proposition conceptuelle comme détaillé dans la section 1.1. Il était donc nécessaire d'étudier en détail le CityGML qui porte ce concept de LOD. Cette disproportion des critiques sera également présente dans la confrontation entre les Level Of Detail (LOD) de CityGML et les Level Of Development (LODt) pour les IFC mais pour d'autres raisons précisées le moment venu. Nous détaillons ci-dessous quelques observations sur des points clés qui limitent l'utilisation du CityGML dans notre contexte de conception d'infrastructure.

Certaines des critiques portées sur le CityGML (et plus tard sur les LOD) seront à nuancer ou à réévaluer suite à la sortie de la prochaine version de CityGML (3.0.) prévue courant 2017 (<https://www.gis.bgu.tum.de/en/projects/citygml-30/>).

A.2.4 Un modèle basé principalement sur le bâtiment ?

Le plus important des modules thématiques de CityGML est le module de base contenant les classes sémantiques pour représenter les bâtiments [Groger et Plumer, 2012 ; Biljecki *et al.*, 2014b]. Alors que le module de ponts et le module de tunnels sont construits comme le module du bâtiment, les autres sont moins détaillées [Lowner *et al.*, 2013]. Bien que le CityGML permette de modéliser et d'échanger la géométrie et la sémantique des objets, si les bâtiments sont le cœur du modèle, il est quelque peu délicat d'affirmer que le CityGML permette la modélisation de l'urbain à des fins d'analyses spatiales et thématiques de la ville. De nombreux travaux sur la ville et la gestion des risques naturels au travers de l'approche systémique et de la résilience démontrent largement que la seule somme des bâtiments n'est absolument pas représentative de la réponse du milieu urbain à des sollicitations de ce type (citons entre autres [Lhomme *et al.*, 2010 ; Toubin, 2014]). Il manque donc, pour une utilisation de CityGML dans un contexte de conception la considération de certains types d'ouvrages comme les infrastructures. Toutefois, il s'agit du seul modèle ouvert interopérable supporté par un organisme à portée internationale (l'OGC) qui existe pour modéliser le milieu urbain.

A.2.5 Faiblesse sémantique

Le modèle de CityGML est très orienté vers le bâtiment et décrit moins précisément les autres modules et autres classes d'objets [Biljecki *et al.*, 2014b]. Les auteurs ajoutent que la sémantique n'est pas très « forte » : on peut retrouver par exemple une cheminée et un escalier dans la même classe générale [Biljecki *et al.*, 2014b]. Jim Plum dont nous citons les travaux suivants [Plume et Mitchell, 2007, 2011] décrit également la sémantique de CityGML comme étant « faible », en tout cas plus faible que celle des IFC (entretien avec l'auteur). Un garage et un balcon appartiennent tous deux à la classe *BuildingInstallation* : il n'y a pas de distinction sémantique entre les deux [Biljecki *et al.*, 2014a]. CityGML a donc bien une gestion sémantique faible qui ne peut être renforcée que par la rédaction de spécifications pour chaque modèle qui contraignent l'application du standard. Cette faiblesse sémantique limite l'utilisation de ce standard en conception pour échanger des informations métiers autres que géométriques et dédiées à de la visualisation.

A.2.6 Le CityGML pour la modélisation d'infrastructures

CityGML est dédié à la modélisation du milieu urbain, qui contient les infrastructures telles que définies au début de la section 1.1. Les modèles de ponts et de tunnels présent dans la Norme de CityGML [2012] ont été développés en étroite analogie avec celui des bâtiments (constitution de l'élément *Bridge* avec des *BridgeParts*, même définition du Level Of Detail, concept d'intérieur et d'extérieur). Dans le diagramme du modèle de tunnel [Norme de CityGML, 2012, Figure 38 page 83] et de pont [Norme de CityGML, 2012, Figure 45 page 100], on retrouve les éléments *window* et *door* : ils peuvent effectivement être présents sur des ouvrages d'art, ponts ou tunnels, mais il manque une couche sémantique métier forte pour décrire et modéliser des objets spécifiques à ces ouvrages. En effet, il devient complexe de modéliser des accès de maintenance dans les caissons du tablier ou des issues de secours de tunnels avec le seul élément *door*. Ces deux modules de pont et de tunnel sont trop basés sur le modèle de bâtiment : cela apporte une cohérence dans le modèle de CityGML et facilite son appropriation mais limite la diffusion et la diversité des utilisations des modèles, trop simples, qui ont en principe vocation à être échangés avec des acteurs de sensibilités différentes. Ensuite, pour les ponts ou les tunnels, la différenciation entre l'intérieur et l'extérieur n'est pas pertinente à moins de considérer par exemple que

l'extérieur serait la partie accessible à la circulation publique. L'intérieur serait dans ce cas le reste de l'ouvrage qui abrite toutes les fonctionnalités mécaniques (porteuses) et éléments fonctionnels ou de flux (réseaux divers). Rappelons qu'il est précisé dans la norme que le champ des tunnels modélisables est focalisé sur de petits ouvrages, de type passage souterrain [Norme de CityGML, 2012]. Cela explique la faiblesse sémantique volontaire pour la description de ces ouvrages. De plus, les structures géologiques, grottes naturelles, des installations minières, et les réseaux de services publics souterrains sont exclus du champ d'application [Groger et Plumer, 2012]. En conséquence, il n'y a pas de continuité entre les ouvrages enterrés décrits dans un modèle CityGML et les éléments du sous-sol plus profond, concernés par les projets d'infrastructures. Cela confirme les propos de Kruger et Kolbe [2012] : les modules du CityGML ne couvrent pas l'ensemble des champs thématiques nécessaires à la description, à l'échanges de données et à la modélisation du milieu urbain.

Concernant le module des objets liés aux transports qui décrivent à la fois les routes, les voies ferrées, les carrefours, trottoirs et pistes cyclables, le modèle proposé ne concerne quasiment que les surfaces affectées à un type de transport. Or, nous avons dans notre contexte de modélisation de projet d'infrastructure, besoin de modéliser de nombreux autres objets : des panneaux, des feux de signalisation, des dispositifs de protection ou du marquage au sol. Ces éléments ne peuvent être simplement classés comme *CityFurniture* : la modélisation des objets de ce type nécessite une description sémantique métier spécifique. La définition d'une ADE⁷ dédiée n'est pas à exclure. En effet, si l'on repense à la faiblesse sémantique de CityGML, un pont, au même titre qu'un bâtiment, possède différents attributs tels le type : suspendu, haubané ou autre pour un pont. Mais d'un point de vue sémantique, le modèle n'empêche en rien qu'un objet pont de type « pont en arc » soit composé de haubans et des câbles de suspente. Tamminga *et al.* [2013] proposent une ADE pour l'étude du trafic routier. CityGML est jugé être plutôt en phase du point de vue sémantique avec les exigences de ces études de flux du transport routier. Le CityGML pourrait donc permettre d'échanger des informations géométriques relatives à la morphologie du réseau routier et sémantiques relatives au trafic.

A.2.7 Problématique de la multiplication des ADE

Le développement d'ADE⁸ pour CityGML élargit les capacités de modélisation du modèle de base de CityGML. Ainsi, le CityGML couvre un champ disciplinaires élargi avec une sémantique plus développée. En contre partie, l'interopérabilité des échanges en CityGML ne peut être conservée que sous certaines conditions. L'utilisation d'ADE implique l'acceptation par tous les acteurs concernés par ces échanges de cette structuration de l'information et la possession d'outils qui importent et exportent de manière satisfaisante. La normalisation des ADE apparaît indispensable à la mise en place d'une interopérabilité au sein des projets urbains et d'infrastructures mais leur multiplicité peut devenir contraignante.

A.2.8 Perspectives d'évolution : CityGML 3.0

Les concepts développés pour le modèle de bâtiment de la directive INSPIRE devraient également être ajoutés prochainement [Groger et Plumer, 2012]. Sont également envisagés : l'intégration d'éléments mobiles comme des grues ou des ponts mobiles, un moyen de compresser les fichiers qui grossissent rapidement à cause de l'utilisation du XML et également du fait que le fichier contient toutes les coordonnées absolues des objets modélisés, ainsi que des compléments pour la modélisation du sous-sol, couches géologiques ou des cavités [Groger et Plumer, 2012].

7. ADE : voir section A.2.2 page 243.

8. ADE : voir section A.2.2 page 243.

A.3 Complément de comparaison entre IFC et CityGML

Nous nous intéressons dans cette section à l'utilisation conjointe des standards IFC et CityGML. Un projet d'infrastructure ayant potentiellement à intégrer ces deux standards, leur cohérence dans la structuration de l'information est à évaluer. Un fichier IFC contient par nature une structure sémantique forte par rapport à CityGML comme nous l'avons évoqué ci-dessus. De nombreux travaux ont démontré la faisabilité partielle de l'intégration d'éléments en IFC dans un modèle CityGML. Des méthodes de transformation sont développées [Benner *et al.*, 2005; Nagel *et al.*, 2009; Isikdag et Zlatanova, 2009; El-mekawy et Östman, 2010; El-mekawy, 2010; El-Mekawy *et al.*, 2012] (d'autres travaux sont cités par El-Mekawy *et al.* [2012]). Dans [Isikdag et Zlatanova, 2009], les auteurs proposent un cadre formel pour une cartographie sémantique entre les deux modèles de données IFC et CityGML pour une transformation automatique de l'un vers l'autre. Les principales conclusions de leur étude rapportent que les modèles IFC contiennent toutes les informations nécessaires pour générer des modèles en CityGML dans les différents niveaux de détails et qu'il est possible de définir des règles pour la transformation géométrique et sémantique. La transformation dans le sens inverse (CityGML vers IFC) est toutefois plus délicate mais ne fait pas particulièrement sens. Nagel *et al.* [2009] soulignent les différences entre les deux modèles qui concernent la représentation spatiale et sémantique. Il est rare d'après les auteurs que les correspondances entre entités *feature* du CityGML et *product* des IFC correspondent directement (1 correspond à 1) : on retrouve plutôt des configurations 1 pour n (un objet CityGML correspond à n objets IFC) ou l'inverse. Ensuite, il a été mis en évidence par El-Mekawy *et al.* [2012] que la correspondance entre les objets de CityGML et des IFC n'était pas toujours possible. En effet, le découpage spatial des IFC (site, étages, espaces, pièces) par exemple n'existe pas dans CityGML. Considérons la création de l'espace *étage*. Dans les IFC il existe en tant que tel (*IfcBuildingStorey*) alors que dans le CityGML, un étage résulte d'une agrégation d'entités de type *building feature* avec un critère de hauteur défini par l'utilisateur [El-Mekawy *et al.*, 2012]. Donc, même si il existe des correspondances entre objets, leur spatialisation n'est pas interopérable de manière automatique, principalement à cause de la flexibilité du modèle des IFC sur la structuration spatiale du bâtiment. Les IFC, disposant d'un nombre supérieure de classes, offrent de plus larges possibilités dans la structuration des objets. Par contre, cette structuration des espaces doit être connue au sein du projet afin que l'ensemble des acteurs puisse alimenter correctement le modèle pour travailler en toute interopérabilité. Même si nous ne travaillons pas dans le détail de ces correspondances, ces travaux mettent en lumière les incompatibilités dans la spatialisation des objets entre les IFC et le CityGML. Leur utilisation conjointe nécessite une structuration des espaces externe aux standards.

Un autre exemple peut être cité : dans les IFC, on ajoute à une ouverture, une fenêtre ou une porte. Les liens entre l'ouverture et les objets qui la remplissent sont décrits (*IfcRelVoidsElement*, *IfcOpeningElement*, *IfcRelFillsElement*). Dans CityGML une porte (*Door*) est une sous-classe d'une ouverture (*Opening*). Elle ne contient d'ailleurs pas d'attributs comme le sens d'ouverture par exemple contrairement aux IFC [El-Mekawy *et al.*, 2012] (ou plutôt les attributs sont à définir pour chaque objet, contrairement aux IFC où ils sont affectés aux classes dans le modèle). De plus, la fenêtre ou porte insérée dans un mur en CityGML n'est pas réellement un objet volumique puisqu'elle est constituée de plusieurs surfaces dont au moins une fait partie de la limite intérieure d'une pièce et au moins une appartient à la limite extérieure du bâtiment (pour le cas d'une ouverture vers l'extérieur). Toutefois, bien que la structuration des objets qui décrivent une ouverture et l'élément qui la remplit diffèrent, il n'y a pas dans ce cas correspondance entre IFC et CityGML [El-Mekawy *et al.*, 2012]. A noter que cette correspondance n'est possible que lorsque l'on passe d'un modèle IFC à un modèle CityGML et subsiste tout de même une perte d'informations sémantiques.

Des travaux complémentaires de ce type sont à mener à propos de ces transformations de modèles à partir des IFC bridge par exemple actuellement en cours de définition vers le CityGML. Mais le passage d'un format vers un autre ne fait sens qu'à partir du moment où les objectifs d'échange, et donc les

objets et informations exactes que l'on souhaite récupérer, sont définies. La définition des objets et du niveau d'information à échanger ne fait pas partie du rôle des standards. D'autres concepts existent pour cela : c'est l'objet du travail de recherche présenté dans ce mémoire.

Tableau comparatif des trois paradigmes de la conception

TAB. B.1 – Tableau comparatif des trois paradigmes de la conception, d'après Bot et Vitali [2011].

Entité de l'activité	Paradigmes de la conception			Conception abstraite
	Conception artisanale	Conception empirique	Modélisateur.	
Sujet	Artisan	Expérimentateur.	Modélisateur.	Modélisateur.
Objet	Développer un artefact ajusté. Concevoir, c'est créer sur site.	Développer un artefact industriel. Concevoir c'est expérimenter hors site.	Développer un artefact générique. Concevoir c'est modéliser.	Développer un artefact générique. Concevoir c'est modéliser.
Outil	Moyens mnémotechniques (archétype), dessin éventuels exposant la solution de principe au commanditaire.	Moyens d'essais physiques, modèles réalistes, éventuellement schématique technique relative à un domaine unique (cinématique, hydraulique, électricité, etc.).	Modèles abstraits utilisables par plusieurs métiers et dans différents domaines, éventuellement encodés dans du logiciel.	Modèles abstraits utilisables par plusieurs métiers et dans différents domaines, éventuellement encodés dans du logiciel.
Communauté	Le Maître, son équipe d'assistants ou d'apprentis, le commanditaire.	Des concepteurs expérimentateurs	Des équipes pluridisciplinaires de concepteurs impliqués dans un projet commun.	Des équipes pluridisciplinaires de concepteurs impliqués dans un projet commun.
Règles assurant la cohérence de la communauté	Partage d'un même archétype et interactions verbales, sur site, entre acteurs en présence.	Partage d'un même site de conception : le bureau d'études, le service des méthodes. Transactions avec un fabricant distant, passant par les plans détaillés (logique de guichet).	Coproduction, partage et circulation de modèles abstraits entre équipes en présence ou à distance.	Coproduction, partage et circulation de modèles abstraits entre équipes en présence ou à distance.
Division du travail	Le Maître dirige l'activité de l'équipe, assure la finition de l'artefact final. Ses assistants ou ses apprentis en réalisent les détails.	Division taylorienne du travail sur la base de disciplines (bureau d'étude Mécanique, Electrique, etc.) ou de métiers (concepteur de produit, méthodiste, responsable des essais, etc.).	Travail divisé à partir de processus codifiés.	Travail divisé à partir de processus codifiés.
Processus	Concevoir en produisant au plus tôt, sur site, l'artefact final. Cet artefact consiste en une variation d'un archétype.	Concevoir en produisant au plus tôt un modèle réaliste de l'artefact final. Le processus est exploratoire et empirique.	Concevoir en développant au plus tôt les modèles de l'artefact abstrait à partir duquel seront générés les artefacts concrets (les solutions). Le processus est supporté par les modèles prescriptifs eux aussi génériques.	Concevoir en développant au plus tôt les modèles de l'artefact abstrait à partir duquel seront générés les artefacts concrets (les solutions). Le processus est supporté par les modèles prescriptifs eux aussi génériques.
Résultat	Un artefact final ajusté.	Plans utiles pour produire en série l'artefact final.	Modèles génériques à partir desquels initier la conception de nombreuses solutions ou processus concrets.	Modèles génériques à partir desquels initier la conception de nombreuses solutions ou processus concrets.

Structuration des objets sur le projet L2 Marseille

Phase	Famille	Ouvrage	Objet n1	Objet n2	Objet n3
02_APA	OA				
		OAC_290	Fondations	Pieux Semelle	
			piles	élévation appareils d'appui	
			tablier	poutre plancher	
			équipements	GC chambres réservations	
		OAC_640	Fondations	Pieux Semelle	
			piles	élévation appareils d'appui	
			tablier	poutre plancher	
			équipements	GC chambres réservations	
		OAC_894	Fondations	Pieux Semelle	
			piles	élévation appareils d'appui	
			tablier	poutre plancher	
			équipements		

FIG. C.1 – Extrait de la structuration des objets du projet L2.

Éléments de définition de MADS : Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles

Tout d'abord, voici les principaux objectifs du développement de MADS évoqués par [Parent et al. \[1997\]](#) :

1. l'orthogonalité des dimensions structurelle, spatiale et temporelle (un choix dans l'une des dimensions ne doit pas limiter les possibilités de choix dans une autre dimension [[Parent et al., 1997](#)]);
2. la possibilité de décrire des relations topologiques ou temporelles entre les entités de manière explicite ;
3. une définition formelle des concepts tels que l'agrégation spatiale ou temporelle, la généralisation - spécialisation et les mécanismes d'héritage associés ;
4. la possibilité de décrire des champs spatiaux continus ;
5. la provision de types spatiaux génériques au delà des types de base ;
6. des notations visuelles intuitives : particulièrement utiles pour la diffusion et l'appropriation des modèles conceptuels de données modélisés.

Les dimensions structurelles (spatiales et temporelles) de MADS sont orthogonales ce qui est d'après [[Parent et al., 2006](#)] la clé pour atteindre un niveau de modélisation complexe. A noter que [Parent et al. \[2006\]](#) définissent quatre dimensions dans MADS qui sont orthogonales : la structure, l'espace, le temps et la représentation. Les auteurs décrivent cet avantage de l'orthogonalité comme rendant ces dimensions indépendantes (ce qui simplifie le modèle) et permettant de les combiner librement (ce qui le rend tout de même puissant) [[Parent et al., 1997](#)]. Le modèle MADS est d'après [[Mignard, 2012](#)] une approche pour la multi-représentation sémantique. Il est défini pour manipuler les bases de données géographiques dans lesquelles une même entité peut être sujette à une multi-représentation en fonction de l'espace ou du temps.

D'après [[Mignard, 2012](#)], deux concepts sont utilisés dans MADS. Le *point de vue* qui matérialise un intérêt spécifique dans la gestion des données et détermine une représentation de ces données lui correspondant (il permet de sélectionner un sous-ensemble de la base avec des éléments intéressants pour un groupe d'utilisateurs en se basant sur les types d'objets ou d'associations et leurs propriétés) et la *résolution* qui « permet d'ajuster de façon dynamique l'accès aux données afin de sélectionner les représentations appropriées à un certain niveau de détail ». La représentation est donc ici directement liée au niveau de détail. Toujours d'après [Mignard \[2012\]](#), des travaux d'adaptation des principes de MADS aux ontologies géographiques ont menés à l'introduction du concept de *contexte* : il est utilisé

pour « définir des profils utilisateurs dans l'ontologie et permettre la sélection d'une sous-ontologie (c'est-à-dire un sous ensemble de l'ontologie) » [Mignard, 2012]. Cela signifie que ce contexte permet de sélectionner uniquement les concepts adaptés à chaque utilisateur. Nous retrouvons également ces concepts dans notre proposition de MCD.

Étapes d'application de l'ingénierie des exigences

La création d'un référentiel d'exigences nécessite plusieurs étapes de réflexion : élucider, analyser, spécifier et valider (d'après [Badreau et Boulanger \[2014\]](#)). C'est un travail clé dans le bon déroulement du projet pour aboutir à un *produit* qui satisfasse au mieux le client ainsi que les utilisateurs. Il est toutefois à adapter à notre secteur d'activité et à ses spécificités. Il n'est pas possible avant le démarrage du projet de spécifier toutes les exigences du système (c'est également le cas des autres industries mais dans une moindre mesure). Dans le secteur de la construction, nous sommes toujours dans une configuration où les exigences changent au cours du projet ce qui, comme l'explique [Badreau et Boulanger \[2014\]](#), est un frein pour la « réussite » du projet. La structuration de notre marché diffère de celle des industries utilisant classiquement l'ingénierie des exigences. Le processus d'établissement d'un référentiel d'exigences décrit dans [\[Badreau et Boulanger, 2014\]](#) est donc à adapter. Toutefois, il est certain qu'il existe une forte marge de progression pour notre industrie en travaillant sur la gestion des exigences au travers de l'ingénierie système. Nous allons ici initier cette progression, tant opérationnelle que conceptuelle. Voyons maintenant plus en détail les étapes nécessaires à l'établissement d'un référentiel d'exigences d'après [Badreau et Boulanger \[2014\]](#).

E.1 Développement des exigences : élucidation

L'élucidation des exigences a pour objectif de faire comprendre le problème et d'identifier les besoins des futurs utilisateurs du système. A noter que cette phase nécessite l'intervention d'un maximum d'utilisateurs futurs du système [\[Badreau et Boulanger, 2014\]](#). Ainsi, le souhait de gérer les exigences d'un système nécessite un travail préliminaire au démarrage du projet de conception de ce système. Ce processus est tout d'abord composé de quatre phases générales pour l'identification des sources d'exigences : domaine d'application du système étudié, contexte de l'activité du système, compréhension du problème à résoudre par le système étudié et compréhension des contraintes des utilisateurs du système étudié. La Figure [E.1](#) reprend ces quatre phases pour le système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données ». Les éléments de la ligne du « contexte de l'activité » renseigne sur ce qui impose des exigences réglementaires, donc des exigences produit, mais également des exigences sur les processus en lien direct avec la mise en place du BIM sur le projet. Les « Attentes et contraintes des utilisateurs » indiquent les prémices d'un autre groupe d'exigences plutôt portées sur les processus mais qui ont des répercussions directes sur la structuration des objets du modèle de l'infrastructure (système étudié dans cette partie).

Il convient ensuite de donner plus de précision sur les sources d'exigences. Cette phase a pour intérêt d'identifier ce qui impose les exigences afin de répercuter par exemple la modification d'une exigence

TAB. E.1 – *Élucidation des exigences (basé sur [Badreau et Boulanger, 2014]) du système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données ».*

Système : modèle de l'infrastructure + base de données du projet		
aspects à examiner	Domaine d'application	Projet de conception d'infrastructure linéaire
	Contexte de l'activité	environnement BIM, travail collaboratif, concourant ; documents de management de l'information existants (PMP, BEP) ; réglementation
	Problème à résoudre	voir problématisation (Chapitre I)
	Attentes et contraintes des utilisateurs	Faciliter le renseignement, l'utilisation et l'échange d'informations ; augmenter la qualité de l'information de conception produite ; en permettre la transmission aux phases postérieures par le renseignement de méta-données...

d'un acteur sur les autres exigences du projet directement concernées par cette modification. [Badreau et Boulanger](#) donnent trois sources principales d'exigences. Elles sont référencées dans le Tableau E.2 avec des exemples d'illustration.

TAB. E.2 – *Identification des sources d'exigences (basé sur [Badreau et Boulanger, 2014]) pour le système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données » dans un environnement BIM.*

Sources d'exigences	Exemples
Parties prenantes :	Client, sous-traitants, entreprises partenaires, membres de l'entreprise participant au projet
Système existant :	Formats, outils et modèles existants
Documents existants :	Guide de management de projet, guide BIM, PMP, BEP

La dernière partie de l'élucidation des exigences consiste à utiliser plusieurs techniques pour identifier les premières exigences. Il peut s'agir d'enquêtes, d'interviews, d'observations terrain ou de prototypages ou cas d'expérimentation par exemple. Dans le premier cas traité ici du système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données », le nombre d'exigences est énorme et ne peut être élucidé d'un seul coup, de manière linéaire. Nous avons précédemment justifié l'utilisation de cas pratiques pour identifier les exigences. Ce procédé en « bottom-up » permet de définir la structuration du modèle par l'expérimentation. Il permet également d'arriver à l'identification d'exigences de plusieurs niveaux d'abstraction et donc à la structuration partielle du modèle de l'infrastructure sans avoir à être exhaustif.

E.2 Développement des exigences : analyse

Cette phase consiste à compléter l'ensemble des exigences établies par la phase d'élucidation. En effet, cette dernière ne permet pas d'aboutir à des exigences précises et l'ensemble d'exigences créé n'est généralement pas exhaustif. L'analyse des exigences élucidées permet de détecter des incohérences ou des lacunes dans les besoins exprimés et constitue un support de communication ou de négociation entre les parties prenantes du projet. L'activité d'analyse a donc pour objectif de rassembler l'ensemble des exigences des parties prenantes. Les exigences ainsi définies expriment le résultat tel qu'il est attendu par les parties prenantes [[Badreau et Boulanger, 2014](#)]. On retrouve dans cette phase une nécessité d'identifier les interfaces du système avec son environnement qui est également nécessaire dans l'ingénierie

système. Une attention particulière doit être portée aux exigences non fonctionnelles (de performances du système et de ses composants) qui sont moins facilement identifiables avec la phase d'élucidation.

L'analyse des exigences consiste à « étudier le problème à traiter et à maximiser la création de valeur métier » : il s'agit de comprendre le lien entre divers besoins du client pour y répondre de manière cohérente [Badreau et Boulanger, 2014] et non pas de manière individuelle pour chaque besoin. Nous ne traiterons pas réellement cette étape de synthèse et de mise en cohérence des exigences élucidées. Ne traitant que quelques exigences par cas d'usage (voir quatrième partie), cette étape n'a pour nous pas d'utilité, bien qu'elle soit par la suite indispensable puisque critique dans l'élaboration d'un référentiel d'exigence.

L'analyse est la dernière étape de définition des exigences avant que l'impact sur le projet de leur mauvaise élucidation ne prenne des proportions critiques pour la pérennité du projet. S'en suivent les phases de :

- spécification des exigences : structuration des exigences et des groupements d'exigences au travers de documents et de structuration entre ces documents ;
- validation des exigences : il s'agit de contrôler que le système réalisé à partir des exigences définies en suivant le processus évoqué précédemment satisfait l'utilisation attendue ; c'est-à-dire que l'on va bien ainsi construire le « bon » système comme le nomment Badreau et Boulanger [2014].

Plusieurs méthodes de validation existent mais elles ne seront pas détaillées ici. Nous ne traitons pas non plus la gestion des exigences, bien que sans elle, les étapes précédentes d'élaboration d'un référentiel d'exigences perdent leur raison d'être. Cette gestion des exigences n'est pas traitée puisqu'une fois les exigences définies (ce qui constitue la partie la plus complexe du travail), leur gestion n'a pas d'influence sur les moyen d'élucider et d'analyser les exigences.

En résumé, pour étudier un système et ses exigences, il convient de procéder en suivant les étapes ci-dessous :

1. identifier les acteurs qui interagissent avec le système (le terme d'acteur désigne aussi bien un acteur physique humain qu'une entité administrative ou une réglementation ; il peut s'agir de cas d'utilisation comme ceux définis dans le formalisme UML) ;
2. identifier leurs exigences et les conséquences sur la structuration du modèle : il s'agit de poser le problème et de décrire ce que tous les acteurs attendent du système ;
3. structurer les exigences en établissant les lien hiérarchiques entre elles, c'est-à-dire répondre à la question : « Cette exigence est la conséquence de quel exigence ou de quel besoin ? » ;
4. lier (ou allouer) les exigences aux objets auxquels elles se rapportent.

Pour les deux derniers points, notons que chaque exigence doit être reliée à une exigence de plus haut niveau, excepté pour les exigences opérationnelles puisqu'elles sont d'un plus haut niveau d'abstraction. Il n'est toutefois pas impossible que des composants de niveau organique répondent directement à des exigences opérationnelles.

Représentation et visualisation de l'information

Cette annexe présente quelques concepts concernant la représentation visuelle et son lien avec la recherche d'information. Elle permet d'initier des travaux futurs qui permettraient d'affiner le concept de complexité géométrique et d'apparence des LOXi proposés dans ce mémoire. Les éléments décrits dans cette annexe permettraient ainsi de produire des représentations visuelles des objets variables selon les objectifs d'analyse d'une scène 3D. Cette représentation serait à lier avec l'information attributaire et sémantique des objets pour en adapter leur apparence et ainsi faciliter la compréhension de scènes 3D ainsi que la recherche d'informations visuelles. Nous proposons également de travailler à l'adaptation de ces outils ou méthodes de représentation non pas pour la modélisation 3D d'information mais pour les modélisations à base de formalismes, cela afin de faciliter la compréhension des nombreux diagrammes qui accompagnent la mise en place du BIM. La question du niveau de détail dans un diagramme UML est par exemple étudié dans [Nugroho, 2009; Fernández-sáez et al., 2012].

A plusieurs reprises nous avons évoqué le fait que la donnée n'est pas toujours modélisée de la même manière alors que l'information qui la décrit reste identique. La représentation de l'information est essentielle pour l'exploitation de l'information structurée au préalable. La structuration de l'information permet par ailleurs de modéliser de manière idéale cette information (nous parlons ici uniquement de modélisation visuelle, de modèle d'objet). Les données sont modélisées en fonction des besoins d'un acteur mais elles jouent également le rôle d'interface entre plusieurs acteurs. Certaines modélisations doivent donc être définies de manière à satisfaire les besoins de plusieurs acteurs. Nous allons voir ci-dessous des techniques de modélisation qui permettent de faciliter la compréhension d'une scène virtuelle ainsi que l'identification des éléments de cette scène. La bonne compréhension de la modélisation visuelle influe directement sur l'efficacité de l'exploitation faite des informations structurées. Une bonne structuration de l'information sans une modélisation pertinent limite l'utilité de cette structuration : la modélisation visuelle rend directement compte du niveau d'abstraction que l'on souhaite porter sur la modélisation. Notons qu'aujourd'hui peu d'outils sont capables de proposer plusieurs modélisations d'un même objet telle qu'elle est évoquée dans les paragraphes qui suivent (nous ne parlons pas ici des LOD mais bien de la multi-représentation visuelle à des fins d'analyse visuelle d'une scène virtuelle). Il y a de nombreuses années que sont établis des systèmes de représentation afin de détecter dès la conception les conflits possibles entre les divers réseaux d'un bâtiment par exemple [Pfefferkorn, 1972]. Cet exemple d'incohérences volumiques est le plus couramment traité et également le plus explicite : c'est un des exemples les plus cités de l'utilisation du BIM. Avec la complexification des projets et la concentration d'objets dans des espaces toujours plus restreints, il convient de développer

des techniques de modélisation pour faciliter ce travail d'analyse de cohérence spatiale. Par contre, filtrer les informations modélisées pour faciliter la visualisation et accélérer la compréhension de l'information pour l'opérateur ne vient pas seulement du fait que sans cela il croulerait sous l'information (en effet avec des processus BIM l'information est plus facilement accessible et assemblée). La modélisation augmente également les performances des analyses visuelles. Et malgré les récents progrès des outils actuels en terme de détection de clashes par exemple, une partie non négligeable de l'analyse de la synthèse de la conception est effectuée visuellement par des experts. Il convient donc, comme il est préconisé à plusieurs reprises dans [Chauvin, 2008] et plus particulièrement dans les pages 269 à 292 dans le chapitre intitulé « Mise en scène d'une cartographie de l'information : modèles et perspectives », de mettre en place des visualisations de l'information avec mise en scène métaphorique pour susciter l'intérêt de l'opérateur.

Cette partie sur l'apparence visuelle à donner aux informations modélisées est fortement basée sur l'ouvrage collectif « Information et visualisation. Enjeux, recherches et application » [Chauvin, 2008]. Il rassemble un grand nombre de travaux concernant la modélisation et la visualisation de l'information sans s'inscrire dans une discipline scientifique spécifique d'application. Ainsi, cet ouvrage nous a permis d'identifier des techniques ou outils pertinents pour répondre aux sujets évoqués ci-dessus. Il apporte des réponses à la problématique de la surcharge d'informations visuelles. Nous citons également le travail de Hascoët et Beaudouin-Lafon [2001] qui traite de la recherche d'informations de manière générale en prenant en compte la diversité des besoins des individus pour la visualisation de la même source d'information. Les auteurs font également le point sur certaines techniques de visualisation et d'interaction pertinentes pour la recherche d'information.

F.1 Visualisation et représentation de l'information

Au delà de la question de la modélisation en trois dimensions, quelle est la pertinence de la modélisation visuelle en 3D des informations par rapport à la modélisation 2D, plutôt appelée dessin ? Premièrement, d'après Cani [2015b], à partir d'un dessin 2D un humain imagine les formes de la manière la plus symétrique, ce qui signifie que l'on donne mentalement la même épaisseur dans la troisième dimension non modélisée que celle vue sur le dessin en 2D. Les gens de métier sont moins gênés par cette nécessaire interprétation puisqu'ils connaissent mieux la forme réelle des objets qu'ils analysent. Par contre, une représentation 2D force à intuitiver l'information de la troisième dimension non disponible et peut toujours créer des erreurs d'interprétation ou une consommation importante de temps pour l'analyse. Deuxièmement, cette fois d'après Dehaene [2011], à partir de représentations 2D d'un objet, pour reconstruire l'objet réel en trois dimensions, le temps nécessaire pour faire tourner l'objet mentalement est linéairement proportionnel à l'angle de rotation mentale nécessaire pour le reconstruire mentalement. On a donc tout intérêt à modéliser l'information directement en 3D ou à ne pas utiliser les plans 2D pour des analyses nécessitant une reconstruction mentale en trois dimensions (détection de clashes, évaluation des besoins en gabarit libre, co-visibilité entre objets etc.).

La quantité d'information que l'on peut mettre dans une interface zoomable [c'est-à-dire dans un environnement 3D utilisant plusieurs niveaux de détail] est qualifiée par Hascoët et Beaudouin-Lafon [2001] de gigantesque [contrairement à un espace plan notamment]. Ainsi, la visualisation d'information nécessite de présenter les données d'une façon telle qu'un utilisateur puisse en extraire un sens que la machine n'aurait pu découvrir (cette citation est extraite de cet article de Hascoët et Beaudouin-Lafon qui traite des moteurs de recherche internet de l'époque : toutefois, nous retrouvons exactement cette problématique dans la troisième partie de ce mémoire qui traite des niveaux de détails nécessaires à une détection de clashes par une machine ou par un humain). Ces deux entités ne détectant pas les mêmes clashes, la modélisation doit donc être adaptée à cette tâche comme cela est expliqué dans cet article de Hascoët et Beaudouin-Lafon). La modélisation définie en fonction des objectifs d'utilisation

de la donnée modélisée renforce l'idée de lier directement les objets à modéliser aux exigences. Plusieurs modélisations sont possibles pour répondre à une même exigence.

D'après [Chauvin, 2008] l'exploration d'une image par un observateur n'est ni aléatoire ni exhaustive, mais elle est restreinte à un sous-ensemble de régions parmi l'ensemble des régions possibles. Ensuite, il a été montré que ces régions d'intérêt sont similaires pour des observateurs différents. Il est donc possible de prédire les régions qui seront explorées [...] et donc *a fortiori* d'organiser les informations de manière à ce que les observateurs s'intéressent aux points qui les concernent réellement (ces « points » peuvent appartenir à une image fixe mais également à un environnement virtuel 3D dans lequel l'observateur se déplace). Il a également été mis en évidence que l'observation d'une image est guidée soit par ses particularités et propriétés s'il n'y a pas de consignes d'observation, soit par les objets recherchés par exemple dans le cas de consignes particulières d'observation. Il y a donc des contraintes d'observation propres à l'image elle-même et d'autres propres au sujet observateur. Pour optimiser l'utilisation de l'information, il faut travailler sur ces deux points. Les propriétés des régions d'une scène virtuelle attirant l'œil sont implicites, naturelles, ou propres aux objectifs de l'exploration [Chauvin, 2008]. Ainsi, la définition des objectifs d'observation pour répondre à des exigences spécifiques d'un projet devient indispensable. De fait, cela justifie les cas d'usages et le concept de BIM use que nous verrons plus tard. Ces deux éléments ont pour vocation l'étude des besoins en modélisation des informations spécifiques à un ou à quelques métiers liés pour des études, analyses et donc réponses à des exigences spécifiques.

Dans [Chauvin, 2008], deux lois fondatrices sont évoquées. Elles guident l'organisation visuelle de l'information : la loi de proximité et la loi de similitude. La première qui considère la distance entre les éléments en regroupant ceux qui sont les plus proches, n'est pas tellement pertinente ici. Par contre, la seconde l'est parfaitement dans notre contexte d'utilisation. D'après cette deuxième loi, dans une observation visuelle, l'observateur a tendance à regrouper les éléments qui présentent des caractéristiques communes de luminance, de taille ou de forme. Par conséquent, il convient de modéliser de manière similaire des objets qui doivent être analysés simultanément par l'opérateur, même si certaines propriétés différencient au départ ces objets. Certains travaux de recherche cités dans [Chauvin, 2008] démontrent que les régions fixées par l'observateur ont une luminance plus élevée que la luminance moyenne du reste de l'image. Les régions les plus observées sont celles où la variabilité de luminance, texture ou couleur sont les plus élevées, ou bien également lorsque des contours ou des bords prononcés existent. Ainsi, la luminance de la scène modélisée influence volontairement ou non l'observateur. Afin de rendre efficace la recherche d'informations par un observateur, nous devons mener une réflexion sur la luminance de l'environnement modélisé selon les objectifs de la modélisation. Toutefois, actuellement aucun outil ne permet de gérer la luminance des objets de manière fluide selon un contexte d'exploitation de la modélisation. Citons une expérimentation évoquée dans [Chauvin, 2008] : lorsqu'un élément graphique pertinent pour la résolution d'une question spécifique est mis en saillance, le nombre de participants résolvant le problème doublait. Une autre composante pouvant influencer la résolution des problèmes est l'expérience du sujet. L'expérience permet aux utilisateurs d'identifier plus facilement les éléments pertinents et pas uniquement les éléments saillants. Ainsi, à la fois la modélisation et l'expérience de l'observateur sont nécessaires à une résolution efficace d'un problème liée à une modélisation d'informations. Cette mise en évidence de certains éléments peut être automatisée dans les modélisations si le modèle conceptuel des objets à modéliser est structuré sémantiquement.

Donc si l'on est capable d'identifier les particularités d'une image, aidé par les méthodes évoquées ci-dessus, il sera possible de prédire les régions d'intérêt d'un observateur [Chauvin, 2008]. Réciproquement, selon les objectifs de l'observation, il est possible de modéliser l'information de manière à attirer l'observateur vers les points d'intérêt qui le concernent. Par contre, ce sont des techniques qui peuvent s'avérer risquées car involontairement, l'observateur peut être amené à observer des zones dont l'observation serait inutile ou puisse l'induire en erreur. Les méthodes sont donc à éprouver. Les outils de synthèse et de visualisation de l'information que nous pouvons utiliser dans nos projets sont à améliorer

dans ce sens.

La bonne exploitation d'une modélisation tient en partie à une représentation fidèle de la « réalité » (objets existants ou objets en conception : ils font également partie de la réalité bien qu'ils n'aient pas pour le moment de réalité physique). On pourrait avoir tendance, pour bien marquer la différence entre une maquette 3D de rendu et une maquette numérique de travail, à produire des rendus qui soient bien différents des objets réels qu'ils représentent. En effet, on pourrait être tenté de modéliser avec des couleurs ou texture originales afin de par exemple marquer les limites d'objets connexes. Toutefois, certains critères de modélisation (qui sont plutôt des conventions sociales) sont à respecter : l'humain, culturellement, associe un rendu visuel avec une signification comme expliqué dans [Chauvin, 2008] (association de couleurs froides avec des valeurs faibles ou négatives par exemple ; le bleu représentera plutôt un élément hydrologique alors que le vert est généralement associée à des de végétation). Il a été démontré dans l'ouvrage cité ci-dessus que nous devons respecter ces conventions culturelles sous peine d'induire de la confusion dans les systèmes perceptifs de l'utilisateur. Toutefois, d'après [Chauvin, 2008], le « relatif » peut être plus pertinent que « l'absolu » dans la modélisation d'informations. Par exemple, la représentation spatiale d'éléments spatiaux n'est pas nécessairement la meilleure approche. Certains métiers liés à l'exploitation des infrastructures gèrent par exemple le plan de signalisation directionnelle sur des synoptiques, donc sans réelle spatialisation des éléments, ou bien au travers d'échelles non cartésiennes. Donc une représentation réaliste 3D est nécessaire uniquement si c'est le type de représentation que l'on attend et si il s'agit de la modélisation la plus pertinente selon un contexte et les questions posées au modèle (exigences auxquelles il faut répondre).

Ajoutons aux éléments décrits ci-dessus le concept de *perception* évoqué par Parfouru [2008] qui se décline en quatre types. Il s'agit de règles à suivre pour une modélisation visuelle efficace.

1. La *perception associative* doit permettre de regrouper des éléments constitutifs d'une représentation graphique. Il s'agit de pouvoir répondre à la question : « est ce que tel élément est associé à tel autre ? ».
2. La *perception sélective* doit contribuer à isoler une catégorie d'éléments dans l'image, c'est à dire être capable du premier coup d'œil, à la première lecture de l'image, de sélectionner l'ensemble des éléments appartenant à une même catégorie, partageant la valeur d'une composante.
3. La *perception ordonnée* doit permettre de faire transiter une notion d'ordre permettant la comparaison et donc le tri d'éléments. Cette perception doit être directe et ne pas nécessiter de consulter une légende.
4. La *perception quantitative*, associée aux valeurs numériques, doit permettre d'identifier de manière naturelle le rapport entre deux signes correspondant alors à la différence entre deux nombres. Il s'agit également de pouvoir faire ressentir les notions de distance et ce sans légende.

En évoquant ces perceptions, nous rejoignons la notion d'*efficacité* de l'image introduite par Bertin. C'est bien cette notion que nous cherchons à développer. Une fois l'information correctement structurée dans un modèle, il est indispensable de la modéliser de manière pertinente en utilisant ces outils.

D'après, Chauvin [2005], ces travaux travail à « une amplification perceptive et cognitive au moyen de divers types de visualisation conçues selon le contenu et les usages pressentis tout en plaçant l'utilisateur au centre de la conception ». Cette modélisation visuelle doit filtrer, organiser et synthétiser la quantité d'information d'une scène tout en générant un sens à partir de données abstraites. L'image n'est pas une fin en soi. Elle n'est qu'un médiateur entre l'expérimentateur et son modèle [Chauvin, 2008]. Mais si elle est fautive ou mal interprétée, toute la valeur de l'information apportée par la structuration du MCD et des processus qui en garantissent la qualité est dévalorisée.

F.2 Représentation du flou de l'information

La qualité de la conception dépend fortement de la qualité des données disponibles. Le problème n'est pas de concevoir sans données, mais d'introduire des évaluations de la qualité des données, ou de leur manque de qualité, dans le processus de conception lui-même.

The sciences of the artificial, Herbert Simon, 1982.

Cette citation illustre parfaitement l'objet de cette section. Plusieurs sujets sont implicites dans la notion de flou mais de manière générale, nous concevons en permanence avec un manque de données comme nous l'avons vu avec la Figure 1.10. C'est d'ailleurs ce qui fait la force de l'humain face à la machine qui ne peut aujourd'hui travailler avec des données partielles. En nous basant sur plusieurs travaux [Miralles, 2008; Tacnet *et al.*, 2012; Zoghلامي, 2013], nous donnons ici les éléments qui participent au flou de l'information :

Inconsistance : contradiction entre deux sources de la donnée ;

Imprécision : approximation de la valeur donnée (« environ X mètres ») ;

Incomplétude : toutes les informations ne sont pas renseignées ;

Incertitude : est-ce que cette information est vraie ? Est-ce que mon interprétation de ce que je vois correspond à la réalité ?

Le problème n'est pas que l'information soit floue ou incomplète : il est plutôt de ne pas connaître l'existence de ce flou dans les données. Pour prendre des décisions en connaissances de cause, la qualité et la validité de l'information doit être qualifiée. La représentation visuelle de l'information peut ensuite traduire cette imprécision à l'aide des outils décrits dans la section ci-dessus. Le texturage permet par exemple de traduire visuellement la qualité de l'information : certaines textures particulières peuvent s'ajouter à la représentation d'un objet lorsque sa précision n'est pas suffisante par rapport à une décision à prendre. Le texturage ne doit plus être uniquement la conséquence de la progression de la conception. Il doit par ailleurs faire partie des règles de modélisation du projet. Des annotations graphiques peuvent également participer à la bonne compréhension de l'information représentée et des problèmes à traiter [Guibert *et al.*, 2009].

Un dernier élément sur ce thème mérite d'être évoqué : il s'agit de l'introduction du flou directement dans les modèles conceptuels et pas uniquement sur la représentation des objets. Évoquons par exemple, le Fuzzy PERCEPTORY étudié dans [Zoghلامي, 2013]. Il permet de décrire le modèle conceptuel de données géospatiales imparfaites.

Application de la proposition de modification des LODEf

L'élément « Projet routier » signifie uniquement la partie roulable du projet d'infrastructure. Le métier « Géométrie » correspond au bureau d'étude qui réalise la géométrie du projet mais pas le dimensionnement de la chaussée par exemple.

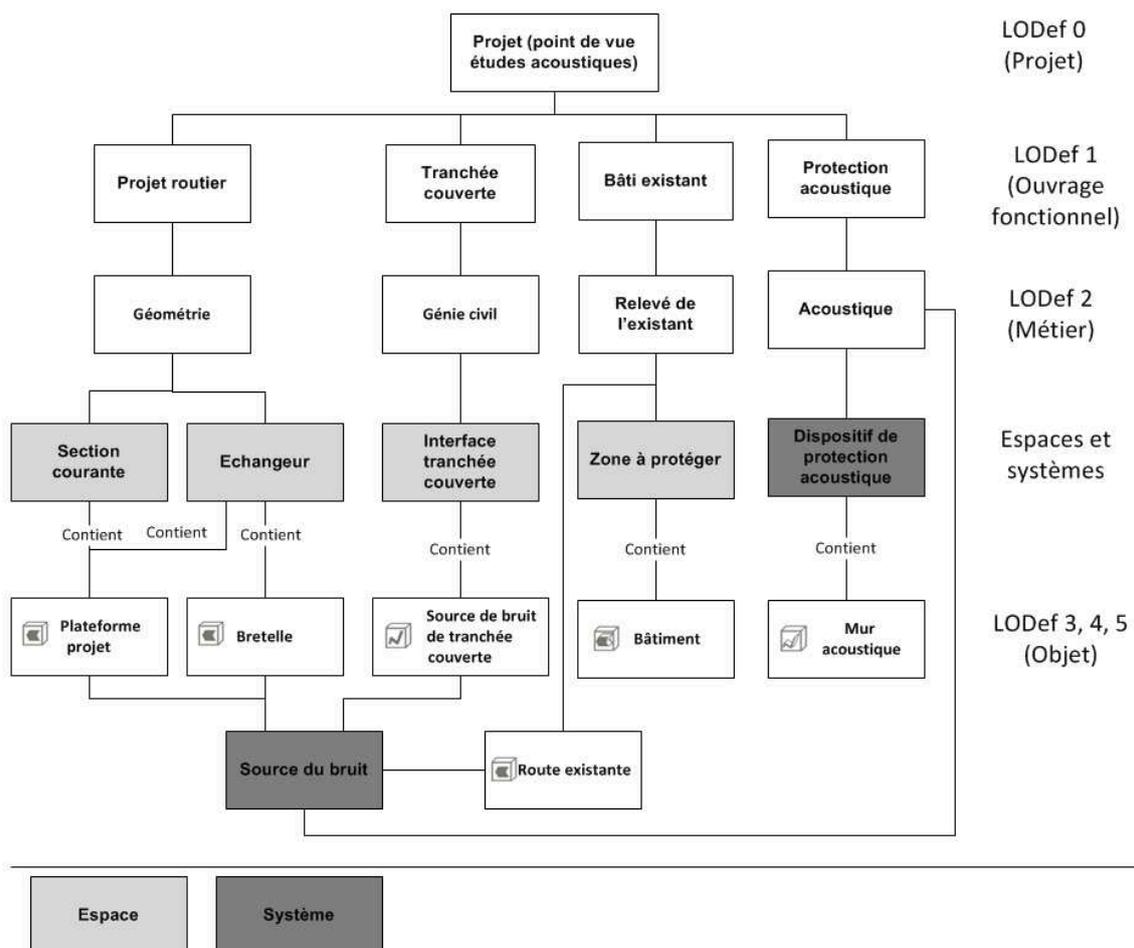


FIG. G.1 – Décomposition d'un projet avec le point de vue du BE acoustique suivant les LODEf du projet Communic d'après [Communic L1, 2010] et avec ajout des classes Espace et Système ; basé sur [Castaing et Tolmer, 2015]. Cette arborescence n'est pas exhaustive.

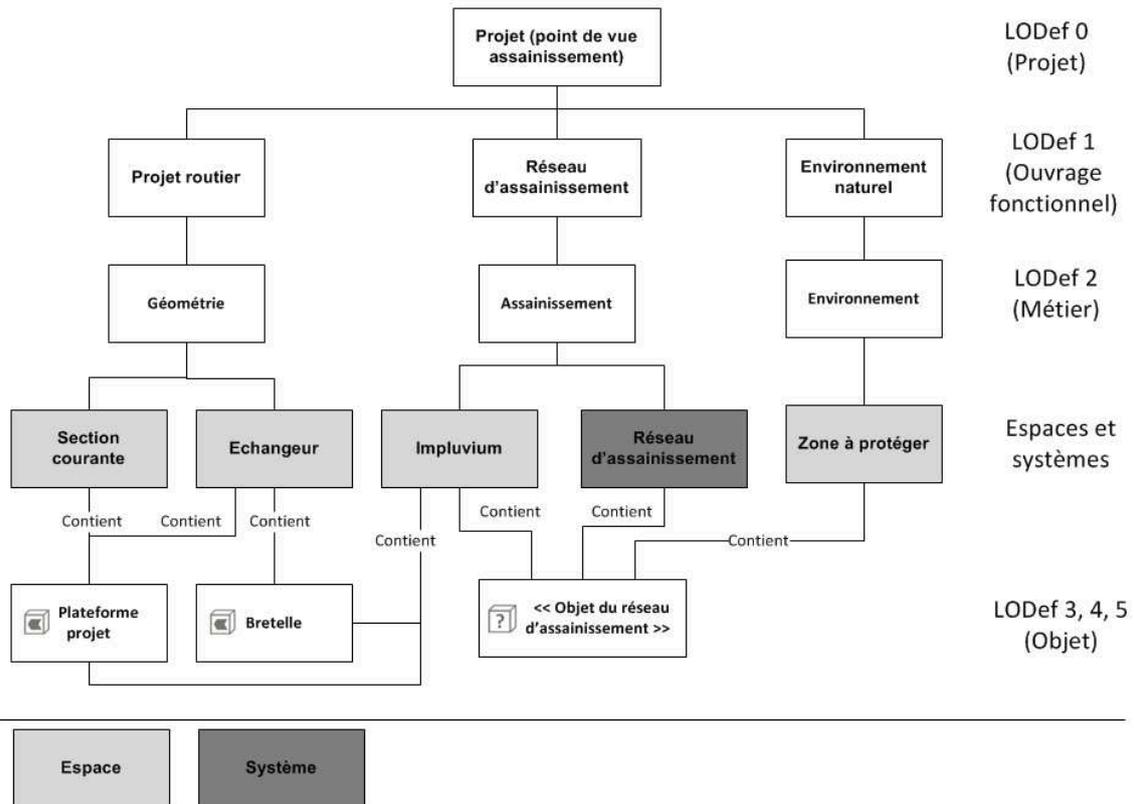


FIG. G.2 – Décomposition d'un projet avec le point de vue du BE assainissement suivant les LODef du projet Communic d'après [Communic L1, 2010] et avec ajout des classes Espace et Système ; basé sur [Castaing et Tolmer, 2015]. Cette arborescence n'est pas exhaustive. Les Objet_I de l'assainissement sont souvent liés de manière paramétrique à la plateforme. La classe « Objet du réseau d'assainissement » regroupe l'ensemble des Objet_I du système d'assainissement (classe introduite uniquement pour des questions de lisibilité de la figure). Ces arborescences ne sont pas exhaustives.

Application de notre proposition de structuration d'un projet

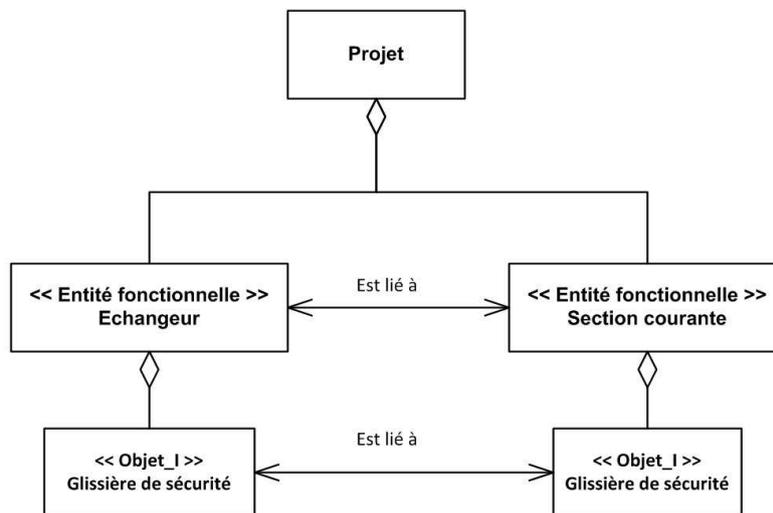


FIG. H.1 – Application de la structuration des classes d'objet pour la modélisation organique d'un projet d'infrastructure. Des glissières de sécurité sont présentes sur les deux Entités fonctionnelles. Elles sont liées à la connexion entre l'échangeur et la section courante.

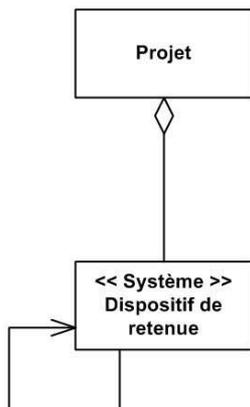


FIG. H.2 – Application de la structuration des classes d'objet pour la modélisation fonctionnelle d'un projet d'infrastructure. Le Système Dispositif de retenue est lié à d'autres Systèmes du même type pour assurer une continuité demandée dans les exigences réglementaires.

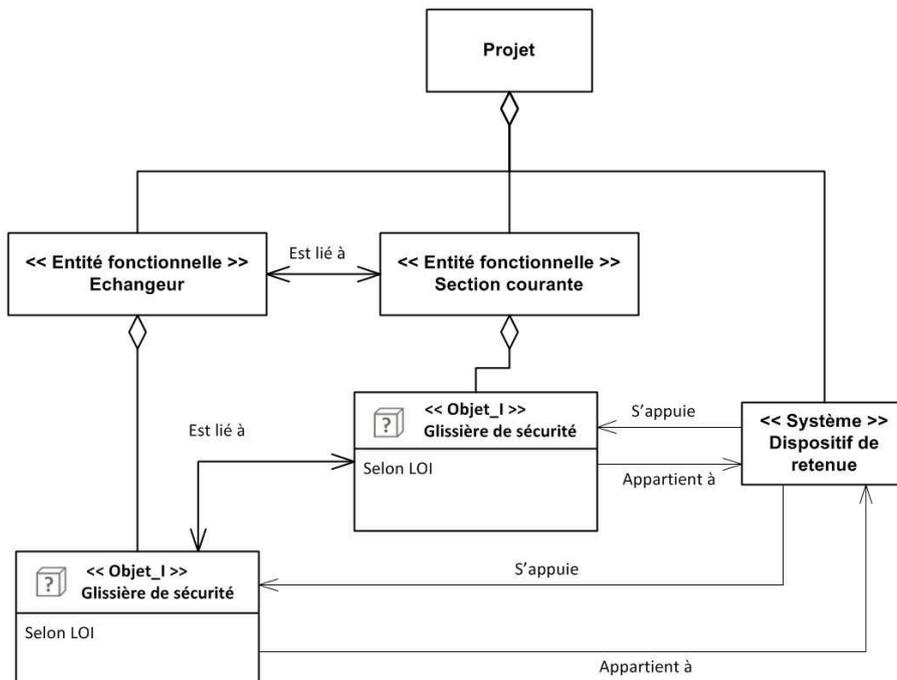


FIG. H.3 – Application des relations multiples entre les classes d'objets de la décomposition fonctionnelle et de la décomposition organique d'un projet d'infrastructure.

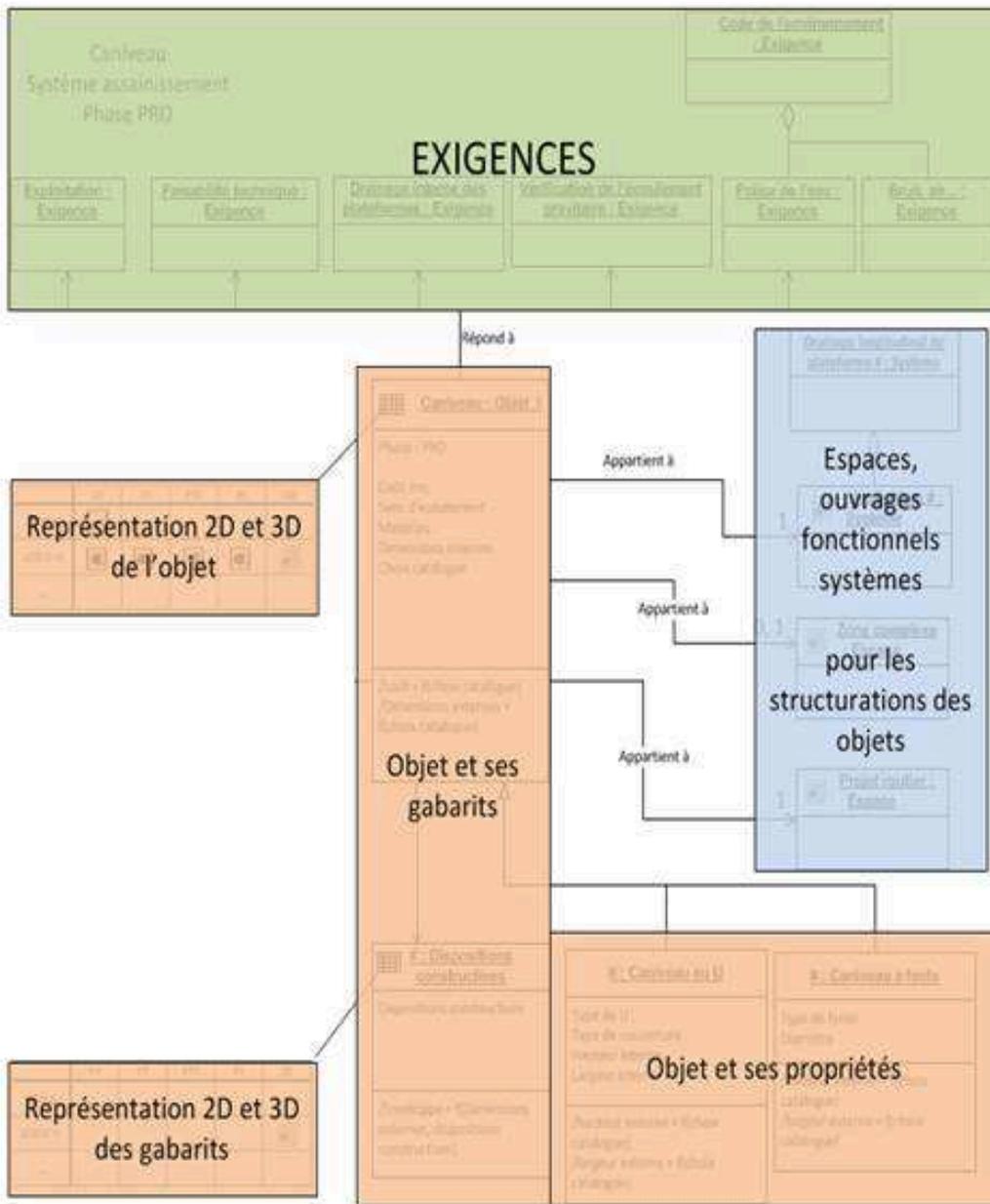


FIG. H.4 – Synthèse de l'application de notre proposition du MCD pour *Objet_1* sur l'objet canalisation..

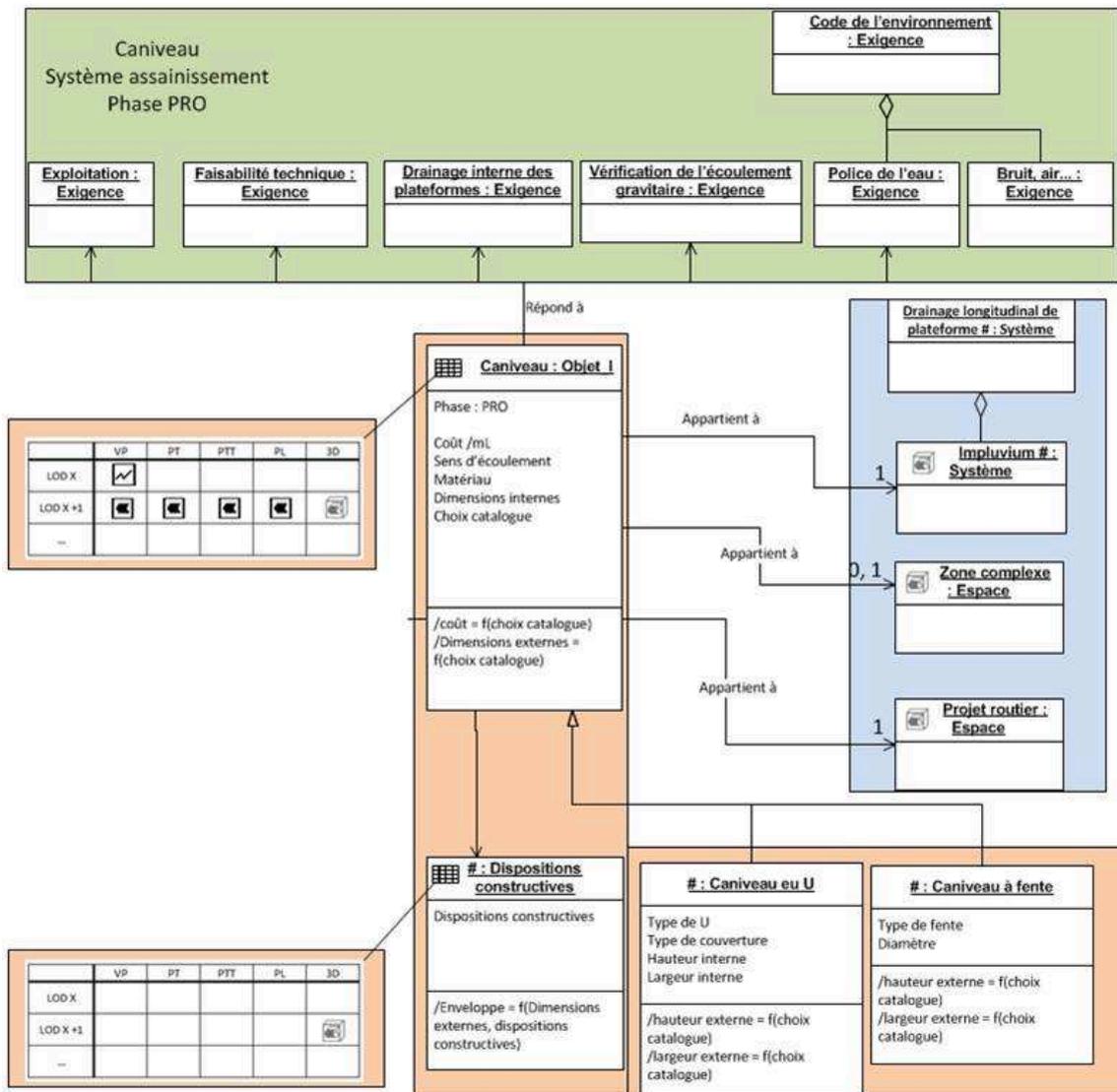


FIG. H.5 – Détail de l'application de notre proposition du MCD pour Objet_1 sur l'objet canalisation..

Workflows des objets du cas de l'étude acoustique

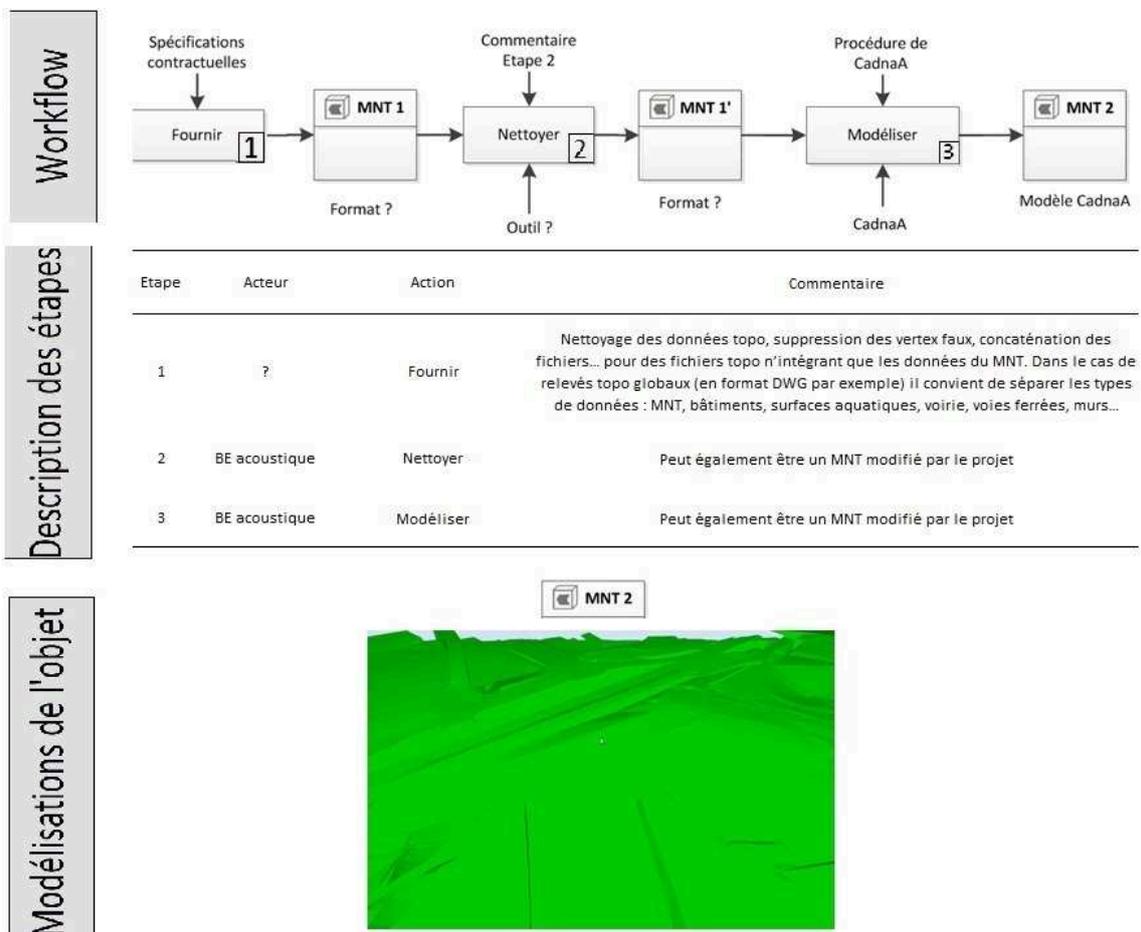


FIG. I.1 – Description du workflow suivi par un *Objet_I* « MNT » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

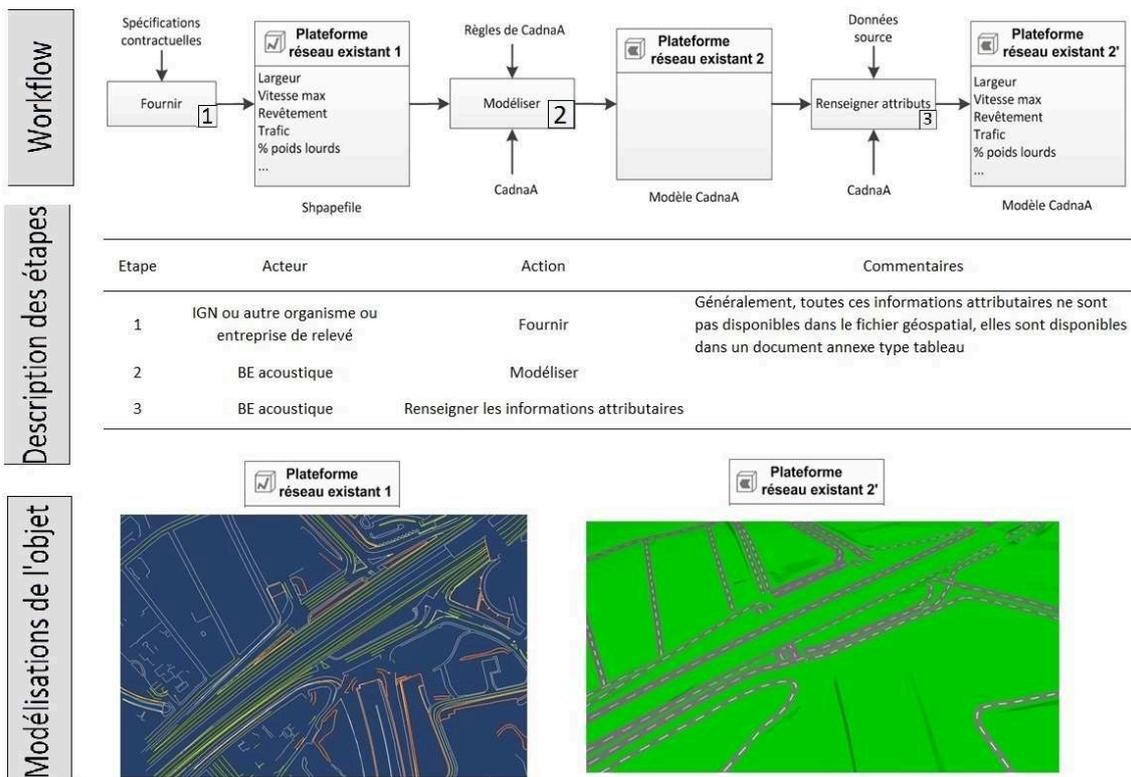


FIG. I.2 – Description du workflow suivi par un Objet_I « plateforme existante » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

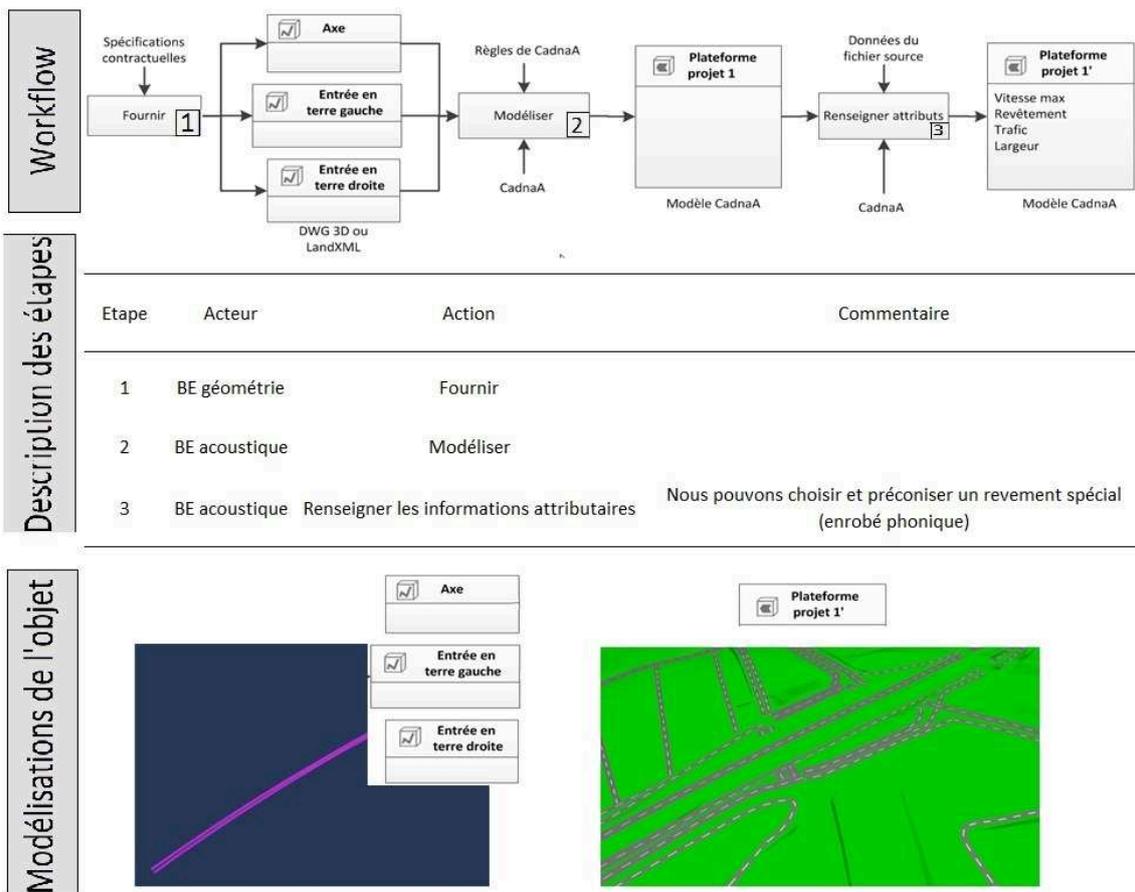


FIG. I.3 – Description du workflow suivi par un Objet_I « plateforme projet » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

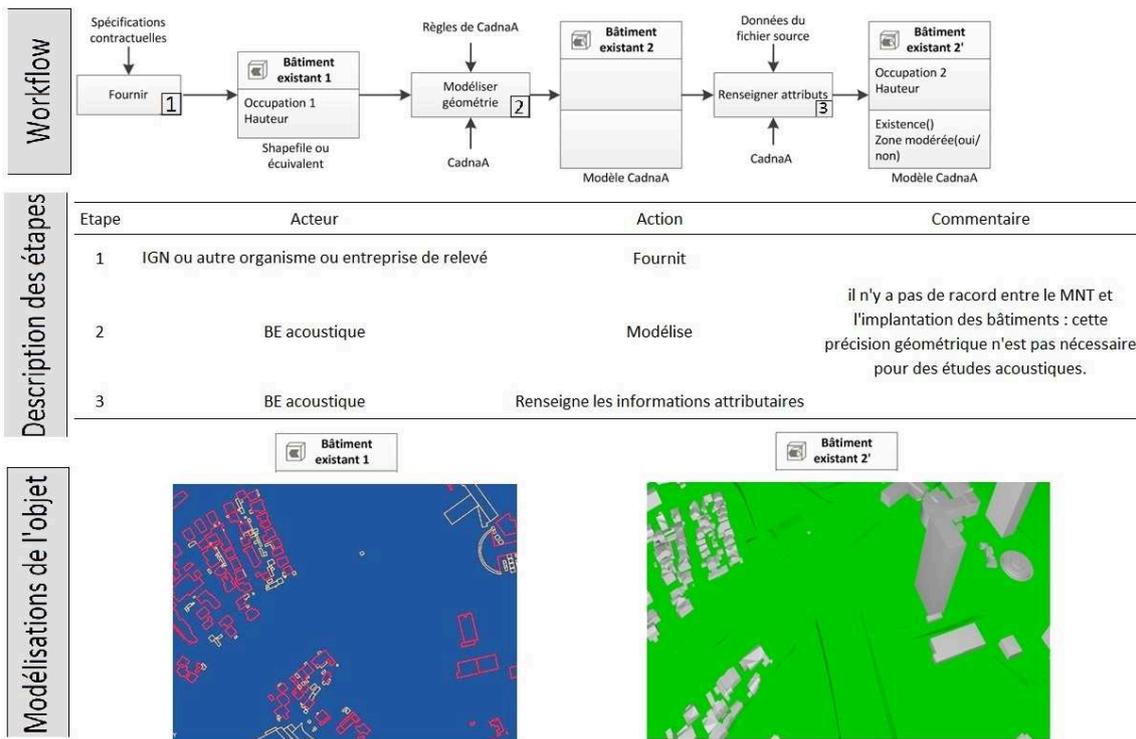


FIG. I.4 – Description du workflow suivi par un *Objet_I* « bâtiment » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

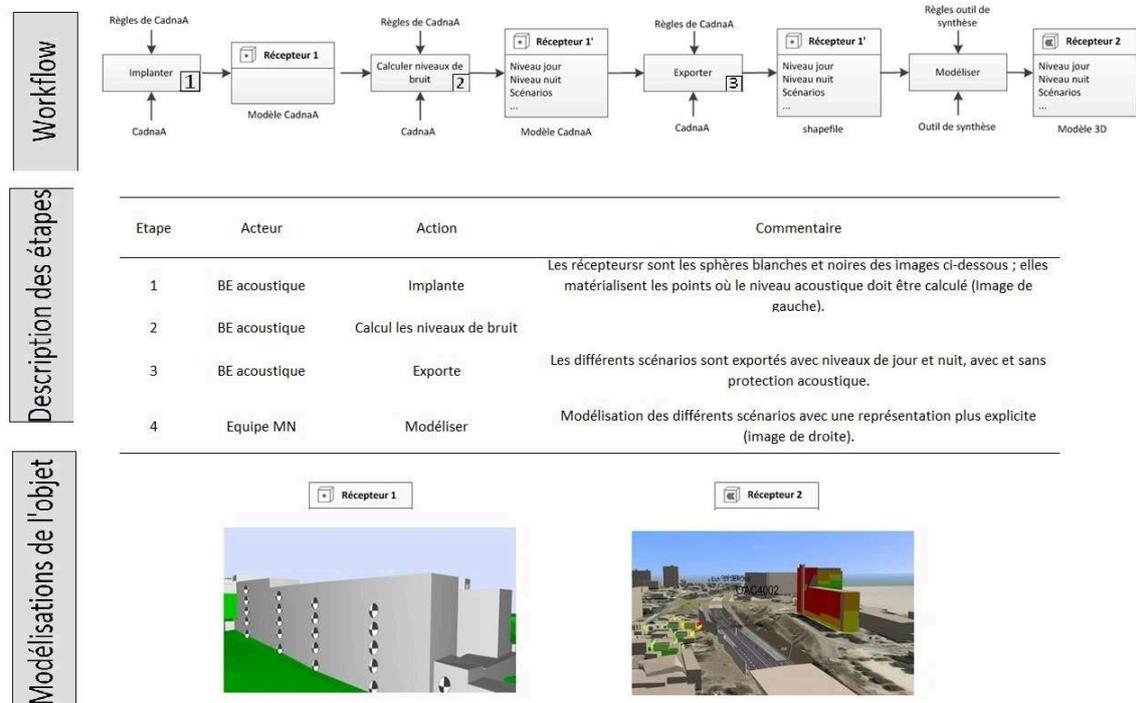


FIG. I.5 – Description du workflow suivi par un *Objet_I* « récepteur acoustique » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

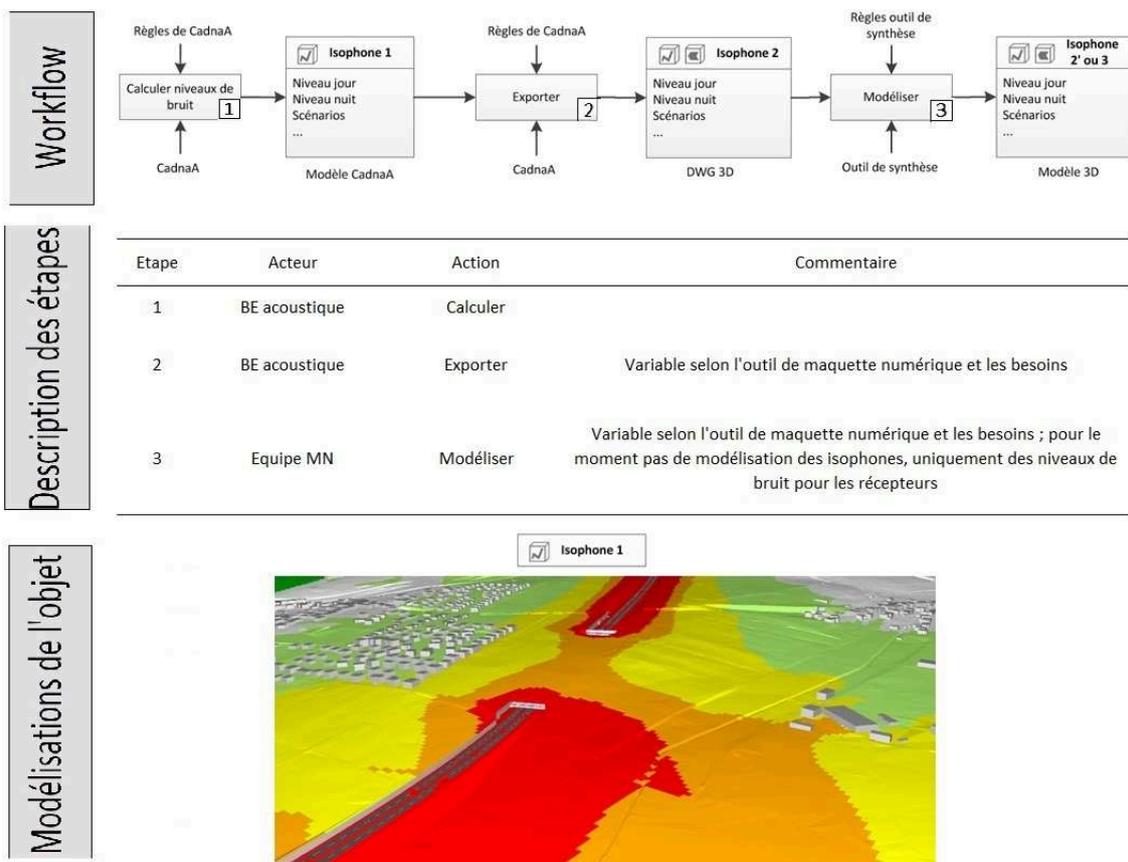


FIG. 1.6 – Description du workflow suivi par un Objet_I « isophone » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.

**Éléments complémentaires pour le cas
d'usage de la préparation à l'audit de
sécurité**

Objet_I	Catégorie d'exigences				Fréquence
	Sécurité	Visibilité	Lisibilité	Gabarit	
Accélérateur					1
Accès service et secours					3
Atténuateur de chocs					1
Balise de divergent (J14)					2
Dispositif de retenue					3
Issue de secours					3
ITPC					2
Mur acoustique					3
Mur anti-recyclage					3
Mur de soutènement					3
Niche					2
Ouvrage de point singulier					2
Panneau de signalisation directionnelle					3
Piédroit tranchée couvert					3
Pile d'ouvrage d'art					3
Plateforme					4
Poteau de portique SV					2
Signal d'affectation des voies (SAV)					4
Signalisation de police					2
Signalisation horizontale					3
Talus					1
Trottoirs					3
TOTAL (sur 22 objets) :	18	16	11	11	

FIG. J.1 – Relations entre catégories d'exigences et Objet_I pour la préparation du dossier d'audit sécurité. Pour certains Objet_I et particulièrement pour les panneaux (directionnels, SAV ou de police), une dimensionnalité 3D est possible mais n'apporte que peu de choses pour la réponse aux exigences à cette phase d'étude.

Objet_I	Classification					Fréquence
	Signalisation horizontale	Signalisation verticale	Equipement	Génie Civil	Aménagement de géométrie	
Accélérateur			1			1
Accès service et secours					1	1
Atténuateur de chocs			1			1
Balise de divergent (J14)			1			1
Dispositif de retenue			1			1
Issue de secours				1		1
ITPC					1	1
Mur acoustique				1		1
Mur anti-recyclage				1		1
Mur de soutènement				1		1
Niche			1	1		2
Ouvrage de point singulier				1		1
Panneau de signalisation directionnelle		1				1
Piédroit tranchée couvert				1		1
Pile d'ouvrage d'art				1		1
Plateforme					1	1
Poteau de portique SV		1				1
Signal d'affectation des voies (SAV)			1			1
Signalisation de police		1				1
Signalisation horizontale	1					1
Talus					1	1
Trottoirs			1			1
TOTAL (sur 22 objets) :	1	3	7		4	

FIG. J.2 – Affectation des Objets_I aux Système pour la préparation du dossier d'audit sécurité.

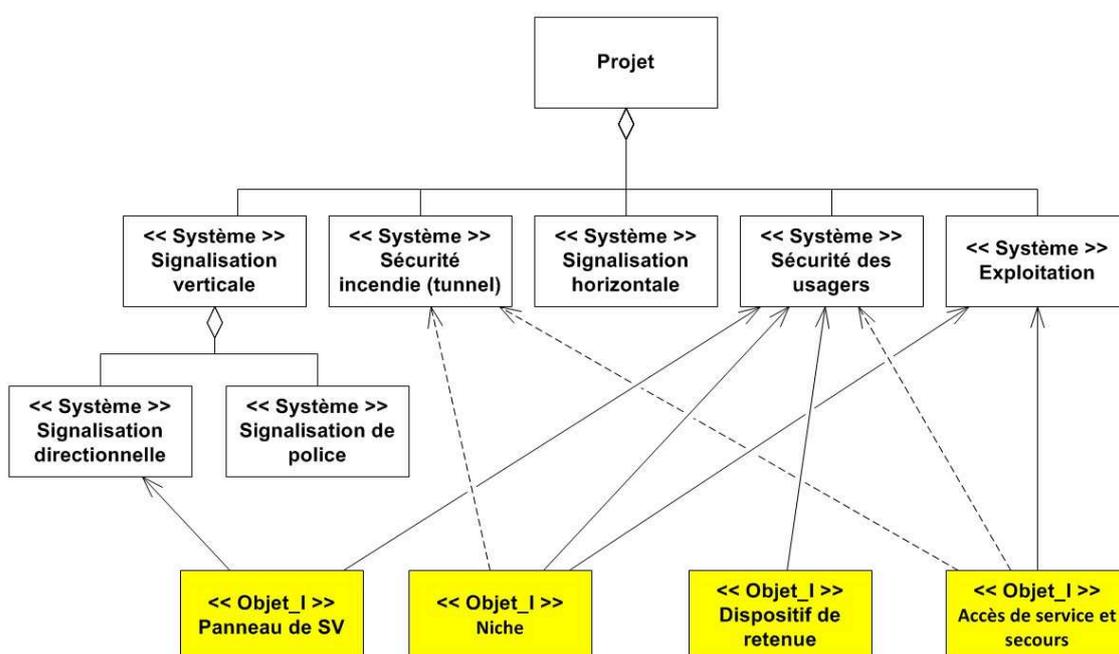


FIG. J.3 – Découpage du projet avec une vue fonctionnelle pour l'audit de sécurité. Il n'est pas possible sur cette vue de dessiner l'ensemble des objets qui appartiennent à ces Systèmes pour des questions de lisibilité. Nous ne présentons ici que certains Objets_I et les liens portent la mention appartient à. Le type de ligne des flèches n'a pas de sens particulier : il facilite par contre la lecture de cette figure.

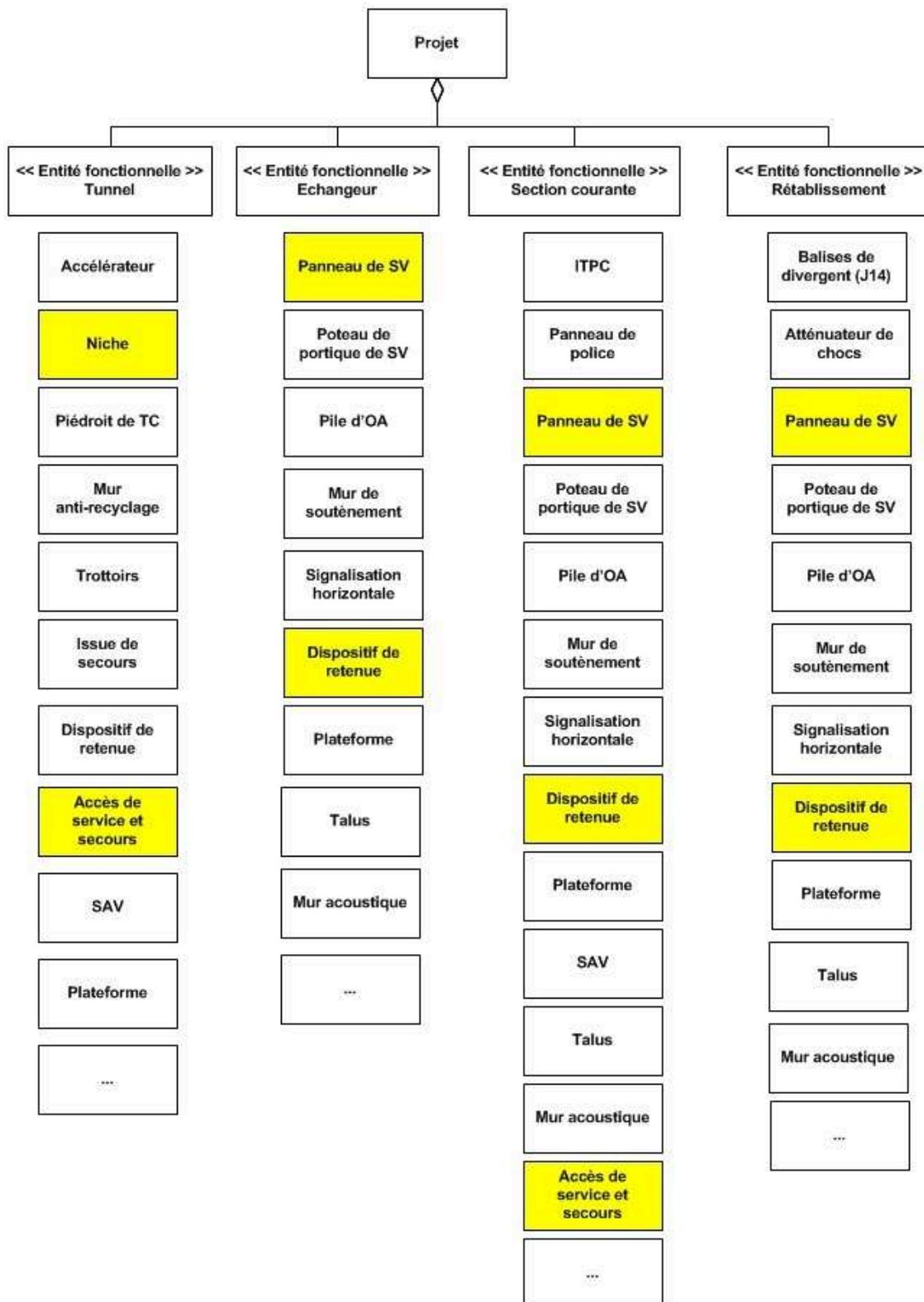


FIG. J.4 – Découpage du projet avec une vue organique pour l'audit de sécurité. Tout objet non spécifié comme *Projet* ou stéréotype « entité fonctionnelle » est un *Objet_I*. Les liens entre Entités fonctionnelles et *Objet_I* ne sont pas dessinés pour alléger la figure. Les rectangles jaunes indiquent les *Objet_I* traités dans la Figure J.3 qui appartiennent à plusieurs *Système*. D'autres *Objet_I* de cette figure font également partie de plusieurs systèmes et sont transversaux à plusieurs Entités fonctionnelles.

Table des figures

1.1	<i>Illustration des morphologies possibles pour une infrastructure.</i>	13
1.2	<i>Les systèmes et l'infrastructure dans le milieu urbain.</i>	14
1.3	<i>Exemple du changement de morphologie d'un ouvrage en fonction de l'échelle.</i>	15
1.4	<i>Triptique des domaines dans lequel s'inscrit notre recherche. Figure adaptée de [Diab, 2000 ; Bonierbale, 2004].</i>	17
1.5	<i>Plan de situation du projet L2.</i>	17
1.6	<i>Illustration du concept de « niveau de détail » pour la modélisation : (a) simplification d'un objet complexe ; (b) définition du « niveau de détail » pour réduire le coût [de modélisation] des objets lointains, petits ou peu significatifs [à partir des objets de (a)], d'après [Luebke et al., 2002] : le rendu pour l'observateur (ici nous même) semble aussi détaillé pour toutes les distances.</i>	21
1.7	<i>Illustration de la représentation ou non d'un objet selon la résolution définie dans [Culot et al., 2003].</i>	23
1.8	<i>Exemple de segmentation routière en fonction des besoins d'après [Guillotte et al., 2009].</i>	26
1.9	<i>Illustration de modélisation liant l'abstraction, l'échelle de travail, la précision et la représentation (figure extraite de [Frédéricque et al., 2008]).</i>	26
1.10	<i>Illustration du paradoxe du processus de conception adapté de [Adolphe, 1991] et [Diab, 2000].</i>	28
1.11	<i>Schéma simplifié d'architecture des fonctionnalités de l'environnement de la maquette numérique [Communic L1, 2010].</i>	33
1.12	<i>Les piliers du BIM normalisé et ouvert (non propriétaire) : triptique http://www.buildingsmart-tech.org/, consulté le 07/03/16.</i>	34
2.1	<i>Deux décompositions partielles possibles d'un Projet : place du Caniveau à fente dans l'arborescence.</i>	45
2.2	<i>Structuration générale pour l'organisation des données sur le cycle de conception selon Communic (Environnement de la Maquette Numérique [Communic L1, 2010]) et le PAS 1192-2 [2013].</i>	47
2.3	<i>Proposition d'ontologie partielle pour l'étude de la biodiversité dans un projet d'infrastructure, d'après [MINnD, 2014].</i>	51
2.4	<i>Illustration de nos axes de recherche identifiés pour répondre aux verrous décrits dans cette première partie. L'ordre des cases « verrou » est choisie pour la lisibilité de la figure et non selon leur ordre d'apparition dans cette première partie.</i>	53
2.5	<i>Illustration de notre démarche de recherche et positionnement de notre proposition de contribution.</i>	54

2.6	<i>Représentation de l'organisation de ce mémoire.</i>	55
3.1	<i>A gauche : relations entre un observateur, un modèle, et un objet (illustration des propos du Groupe Structuration de Données [1991]). A droite : adaptation de la figure de gauche à notre contexte de travail.</i>	65
3.2	<i>Illustration des trois axes de la modélisation d'après [Bouzeghoub, 2006].</i>	66
3.3	<i>Relation entre les points de vue des acteurs, les ontologies de domaine et les Objet_I (voir le glossaire).</i>	68
3.4	<i>Illustration des relations entre les différents objets considérés dans notre travail.</i>	71
3.5	<i>Arborescence des diagrammes en UML, d'après [Audibert, 2014].</i>	75
3.6	<i>Illustration de quelques possibilités de cardinalité pour l'UML. Un Doctorant rédige (en général) une seule Thèse. Une Thèse n'est rédigée (de préférence !) que par un seul Doctorant (cette cardinalité 1 - 1 peut ne pas être spécifiée sur un diagramme UML). Un Doctorant participe à au moins une Conférence (1..*). Dans une Conférence il peut n'y avoir aucun Doctorant (0..*). Un Encadrant encadre un nombre fini de doctorant et un doctorant est encadré par un nombre fini d'Encadrant (relations 1..n et 1..m ; $(n, m) \in \mathbb{N}$).</i>	76
3.7	<i>Exemples de combinaisons de pictogrammes avec PERCEPTORY, d'après [Zoghلامي, 2013].</i>	78
3.8	<i>Modèle détaillé d'une « macro-entité » à spatialité complexe d'après [Miralles, 2008].</i>	79
3.9	<i>Illustration du contenu des trois axes de la modélisation évoqués en section 3.2 en considérant les ontologies. Il s'agit ici d'un cas fictif simplifié basé sur le cas des études acoustiques, détaillé en quatrième partie.</i>	80
3.10	<i>Deux exemples pour illustrer les deux premiers axes de la modélisation évoqués en section 3.2.</i>	80
4.1	<i>Intégration de l'ingénierie système dans un projet et impact sur les systèmes « à faire » et « pour faire » (inspiré de Fiorèse et Meinadier [2012]).</i>	84
4.2	<i>Lien entre le projet, son produit et les processus d'ingénierie système. Les autres types de processus (processus de conception, de management...) sont inclus dans l'élément Projet. Ce diagramme est extrait de [Fiorèse et Meinadier, 2012].</i>	85
4.3	<i>Différenciation du projet d'infrastructure et du projet de conception de l'infrastructure pour l'identification du système à faire. Cette représentation simplifiée ne considère pas le recouvrement possible de certaines phases selon le contrat. La considération de l'environnement contractuel (loi MOP, PPP, etc.) n'influence pas la définition du système à faire à ce niveau de représentation. Il reste identique alors que le système pour faire lui peut varier selon l'organisation contractuelle des acteurs.</i>	86
4.4	<i>En se basant sur la définition des relations entre observateur, modèle et objet de la Figure 3.1 page 65, rappelée ici à gauche, cette figure présente en partie de droite la place des systèmes à faire évoqués ci-dessus en Figure 4.3 et illustrés en Figure 4.5.</i>	87
4.5	<i>Illustration des systèmes à faire de la Figure 4.4.</i>	87
4.6	<i>Confrontation entre deux manières d'identifier des exigences : partie de gauche basée sur [Badreau et Boulanger, 2014] (définition des types d'exigences) et partie de droite basée sur [Krob, 2009] (visions portées sur un système (à faire ou pour faire) et qui influence la structuration des exigences).</i>	90
4.7	<i>Exemple de relations entre la structuration des exigences et des objets sur une seule vision portée sur le projet.</i>	91
4.8	<i>En partie haute : vues de maquette numérique. En partie basse : vue en élévation pour l'interprétation d'une exigence technique de gabarit en tunnel à différentes phases de projet, PRO et EXE. L'exigence n'est pas satisfaite car : en phase PRO l'accélérateur clash avec la dalle supérieure et en phase EXE la hauteur libre sous l'accélérateur est inférieure à la hauteur minimale réglementaire.</i>	95

4.9	<i>Intégration des concepts et outils proposés dans cette deuxième partie du mémoire de thèse par rapport au système pour faire et au système à faire. (Pour rester cohérent avec les précédentes figures, les liens notés « fait partie du » entre ingénierie système, ingénierie des exigences et le système pour faire peuvent également être définis par la mention « bénéficie au ».)</i>	96
4.10	<i>Relations entre le système à faire et son environnement : la lecture de gauche à droite de cette figure retrace les hypothèses heuristiques prises pour construire notre réflexion dans le nouveau paradigme de « conception abstraite ».</i>	97
4.11	<i>Mise en évidence de l'interaction entre les exigences de processus et les exigences produit (voir Figure 4.6 page 90 pour rappel) qui portent sur l'ouvrage à construire (infrastructure physique). Les points d'entrée pour la lecture de cette figure sont les exigences.</i>	99
4.12	<i>Intégration des processus et objets liés au BIM dans le processus classique de projet. Les éléments en traits gras sont ceux spécifiques à l'intégration du BIM dans le projet et sont donc fortement liés aux BIM uses du projet.</i>	100
5.1	<i>Les 5 LOD définis par CityGML d'après [Norme de CityGML, 2012].</i>	109
5.2	<i>Représentation des 5 LOD de CityGML appliqués à un bâtiment courant [Lowner et al., 2013].</i>	109
5.3	<i>Modélisation en UML de la multi-représentation d'un objet au travers des LOD (lod sur la figure), d'après [Norme de CityGML, 2012]</i>	110
5.4	<i>Variantes de modélisations permises par CityGML pour un bâtiment au LOD2 (ligne 1 affiche les possibilités par rapport à l'objet à modéliser en ligne 2)[Benner et al., 2013].</i>	113
5.5	<i>Modélisation de l'unicité de l'univers du discours décrit par le CityGML.</i>	114
5.6	<i>Deux décompositions possibles pour un même LOD.</i>	115
5.7	<i>Représentations informelle des objets d'un bâtiment en CityGML.</i>	116
5.8	<i>Exemple simplifié de perte de continuité topologique au changement de LOD.</i>	117
5.9	<i>Applicaton des LOD à l'élément TransportationComplex aux LOD0, 1 et 2 à 4 (source : Rheinmetall Defence Electronics), extrait de [Norme de CityGML, 2012].</i>	121
5.10	<i>Illustration de la variabilité de la taille des objets à considérer dans un projet de conception d'infrastructure.</i>	121
5.11	<i>Mise en évidence de la différence du niveau de conception entre la phase AVP et PRO. l.projet L2</i>	128
5.12	<i>Définition générale des Level Of Detail (de type LODt), d'après [BIMForum, 2015].</i>	129
5.13	<i>Illustration sur un exemple du lien entre croissance du LODt (partie gauche, extraite de [BIMForum, 2015]) et spécialisation de l'objet (partie droite).</i>	129
5.14	<i>Exemple de génération de clash faux positifs due à une trop grande décomposition des objets. Figure extraite de [Leite et al., 2011].</i>	132
5.15	<i>Représentation de l'avancement du LODt (300, 350 et 400) pour l'objet Floor Structural Frame, d'après [BIMForum, 2015].</i>	133
5.16	<i>Hiérarchie des niveaux d'objets du projet Communic (ou niveaux de définition LODef) [Communic L1, 2010].</i>	138
5.17	<i>Exemple de décomposition d'un projet en objets avec les LODef[Communic L3, 2010].</i>	139
5.18	<i>Triptique des domaines dans lequel s'inscrit notre recherche et mise en évidence des incohérences dans les échanges d'information (en rouge) entre ces domaines, du fait des différents concepts de niveaux. Figure adaptée de [Diab, 2000 ; Bonierbale, 2004].</i>	140
6.1	<i>Proposition de modification de la structuration des niveaux de définition LODef du projet Communic. Figure basée sur [Castaing et Tolmer, 2015].</i>	148
6.2	<i>Illustration de la relation entre un Acteur du projet et les LOA pour répondre à une exigence.</i>	150

6.3	<i>Application des axes de la modélisation. Intégration des LOXi dans ce processus.</i>	154
6.4	<i>Structuration des classes d'objet pour la modélisation organique d'un projet d'infrastructure. Illustration de la cohérence avec les vues opérationnelle et organique de la structuration des exigences et intégration de la proposition des LOXi. Voir illustration applicative en Figure H.1 Annexe H.</i>	155
6.5	<i>Structuration des classes d'objet pour la modélisation fonctionnelle d'un projet d'infrastructure. Illustration de la cohérence avec la vue fonctionnelle de la structuration des exigences et intégration de la proposition des LOXi. Voir illustration applicative en Figure H.2 Annexe H.</i>	155
6.6	<i>Relations multiples entre les classes d'objets de la décomposition fonctionnelle et de la décomposition organique d'un projet d'infrastructure. Voir illustration applicative en Figure H.3 Annexe H.</i>	157
6.7	<i>Proposition de MCD pour les Objet_I : détail des relations entre un Objet_I du système à faire et les systèmes et Entités fonctionnelles du projet. Voir illustration applicative en Figure 7.19.</i>	158
7.1	<i>Tâches pour lesquelles le BIM est utilisé [sur des projets de bâtiment, puisqu'il n'existe pas d'information de ce type pour les projets d'infrastructures] d'après [Burcin et Rice, 2010]. En pratique, une majorité de ces utilisation se retrouvent dans les projets d'infrastructures.</i>	168
7.2	<i>Domaine d'impact des BIM uses : ils décrivent et contiennent le lien entre le système à faire et son environnement.</i>	170
7.3	<i>Exemple de processus de conception décrit en BPMN. Figure extraite de [Berard et Karlshoej, 2011].</i>	172
7.4	<i>Légende de diagramme SADT modifié utilisé pour le cas d'usage « Étude acoustique » (voir section 7.3 page 174).</i>	173
7.5	<i>Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement. Au travers de ces étapes, le BE Acoustique définit les type de mur antibruit (réfléchissant ou absorbant), l'épaisseur et la hauteur de crête. Cela afin de répondre à une exigence qui devra être respectée malgré les modifications des murs antibruit pour des considérations architecturales et paysagères.</i>	175
7.6	<i>Approche triple pour l'identification des besoins et des échanges du cas des études acoustiques. Ces trois approches permettent d'identifier les besoins en terme d'utilisation du système (modèle de données et données), d'échanges d'information et d'exploitation visuelle dans des outils de coordination.</i>	176
7.7	<i>Relation entre le projet d'étude acoustique (système pour faire), sous-projet du projet de construction de l'infrastructure, le système à faire du projet d'étude acoustique et l'ingénierie système.</i>	177
7.8	<i>Mise en contexte du système étudié (système de protection acoustique, dit « système à faire ») avec identification du lien avec les objets étudiés dans le cas des études acoustiques.</i>	177
7.9	<i>Cas d'utilisation pour le modèle métier de l'outil CadnaA.</i>	178
7.10	<i>Cas d'utilisation pour tous les sortants de l'outil métier, contractuels ou non.</i>	178
7.11	<i>Cas d'utilisation pour une maquette numérique de synthèse (actions relatives uniquement aux données acoustiques).</i>	179

7.12	<i>Cette figure reprend les classes d'objet relatives à l'étude acoustique complétées des pictogrammes de PERCEPTORY (voir section 3.8 page 77 pour rappel). Les pictogrammes avec un point d'exclamation indiquent que la géométrie des Objet_I de la classe est « complexe » et qu'elle ne peut être détaillée ici. Cela vient des nombreuses transformations de dimensionalité et de géométrie que subissent les Objet_I (voir section 7.3.5). Le type de trait qui matérialise les liens entre les Systèmes et les Objet_I n'a pas de signification particulière : cette distinction sert seulement à faciliter la lecture. Les flèches ne sont pas non plus dessinées pour alléger la représentation mais conformément au modèle proposé en Figure 6.6 page 157, elles sont toute dans le sens « Objet_I » vers « Système » et portent la mention « appartient à ».</i>	181
7.13	<i>Exemple de description du workflow suivi par un Objet_I « mur anti-bruit » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	182
7.14	<i>Les éléments directement impactés par notre analyse présentée ici sont matérialisés en vert. Les cadres en orange sont ceux considérés pour notre étude et principalement pour la définition des besoins.</i>	184
7.15	<i>Cas d'utilisation pour les modèle métier des différents BE dont les données sont attendues pour la préparation à l'audit de sécurité.</i>	186
7.16	<i>Cas d'utilisation pour une maquette numérique de synthèse (actions relatives uniquement aux activités de préparation de l'audit de sécurité).</i>	186
7.17	<i>Relation entre les études de préparation à l'audit de sécurité (système pour faire), le système à faire et l'ingénierie système.</i>	187
7.18	<i>Les cadres en orange sont ceux considérés pour notre étude et principalement pour la définition des exigences.</i>	187
7.19	<i>MCD objet instancié pour l'Objet_I dispositif de retenue dans le cadre de la réponse aux quatre exigences citées ci-dessus. Les couleurs ne servent qu'à identifier les différentes classes. (Cette figure est non exhaustive du point de vue des exigences pour ne pas devenir illisible.)</i>	191
7.20	<i>Exemple de non respect de la visibilité simultanée à distance réglementaire, fonction de la vitesse de circulation, sur le panneau de sortie (sortie 34, panneau de type D31) et sur la balise de divergent (balise verte, type J14, entourée en rouge en bas à droite de l'image de droite : elle n'est pas visible sur l'image de gauche à la distance réglementaire). Extrait de la MN d'avant projet. On remarquera l'absence des porteurs de ces panneaux dans cette modélisation.</i>	192
7.21	<i>Décomposition symbolique d'un Panneau de signalisation verticale. Cette décomposition est spécifique au LOA défini pour répondre aux exigences évoquées ci-dessus. Le Panneau de signalisation verticale seul correspond à un autre LOA.</i>	193
7.22	<i>Illustration de la « zone d'isolement » derrière les dispositifs de retenue béton, d'après [SETRA, 1988].</i>	195
8.1	<i>Proposition du MCD pour Objet_I avec considération du retour d'expérience des cas d'usage.</i>	198
8.2	<i>Exploitation des concepts proposés de LOD et LOI selon l'espace dans lequel ils décrivent l'information du système à faire.</i>	200
8.3	<i>SADT du processus d'application d'un BIM use (étape 2 ci-dessus) défini préalablement dans l'étape 1 grâce à notre proposition de MCD.</i>	203
8.4	<i>Modifications apportées à la Figure 4.9 page 96 suite au retour d'expérience de l'implantation du BIM sur le projet L2 Marseille.</i>	204

8.5	<i>A gauche la première proposition issue de Fiorèse et Meinadier [2012]. A droite notre adaptation de la partie de gauche suite aux expérimentations de notre proposition de MCD. Les modifications, en rouge, remettent le Projet au centre des attentions.</i>	205
8.6	<i>Illustration détaillée de notre démarche de recherche et positionnement de notre proposition de contribution.</i>	206
8.7	<i>Place des ontologies de domaine pour améliorer la cohérence sémantique entre les trois domaines qui concernent les projets d'infrastructures routières urbaines.</i>	213
8.8	<i>Relations entre système, modèle, méta-modèle et langage, d'après [Hammoudi, 2010].</i>	215
8.9	<i>Relations entre l'ingénierie système et les concepts de modèle, méta-modèle et langage.</i>	216
8.10	<i>Place de la MBSE pour l'évaluation de la cohérence structurelle des modèles entre les trois domaines qui concernent les projets d'infrastructures routières urbaines.</i>	217
8.11	<i>Exemple de modélisation d'un atténuateur de chocs.</i>	234
8.12	<i>Exemple de modélisation d'une balise J14.</i>	234
8.13	<i>Exemple de modélisation d'un dispositif de retenue.</i>	235
8.14	<i>Exemple de modélisation d'un mur anti-recyclage.</i>	235
8.15	<i>Exemple de modélisation d'SAV.</i>	235
C.1	<i>Extrait de la structuration des objets du projet L2.</i>	251
G.1	<i>Décomposition d'un projet avec le point de vue du BE acoustique suivant les LODef du projet Communic d'après [Communic L1, 2010] et avec ajout des classes Espace et Système ; basé sur [Castaing et Tolmer, 2015]. Cette arborescence n'est pas exhaustive.</i>	265
G.2	<i>Décomposition d'un projet avec le point de vue du BE assainissement suivant les LODef du projet Communic d'après [Communic L1, 2010] et avec ajout des classes Espace et Système ; basé sur [Castaing et Tolmer, 2015]. Cette arborescence n'est pas exhaustive. Les Objet_I de l'assainissement sont souvent liés de manière paramétrique à la plateforme. La classe « Objet du réseau d'assainissement » regroupe l'ensemble des Objet_I du système d'assainissement (classe introduite uniquement pour des questions de lisibilité de la figure). Ces arborescences ne sont pas exhaustives.</i>	266
H.1	<i>Application de la structuration des classes d'objet pour la modélisation organique d'un projet d'infrastructure. Des glissières de sécurité sont présentes sur les deux Entités fonctionnelles. Elles sont liées à la connexion entre l'échangeur et la section courante.</i>	267
H.2	<i>Application de la structuration des classes d'objet pour la modélisation fonctionnelle d'un projet d'infrastructure. Le Système Dispositif de retenue est lié à d'autres Systèmes du même type pour assurer une continuité demandée dans les exigences réglementaires.</i>	268
H.3	<i>Application des relations multiples entre les classes d'objets de la décomposition fonctionnelle et de la décomposition organique d'un projet d'infrastructure.</i>	268
H.4	<i>Synthèse de l'application de notre proposition du MCD pour Objet_I sur l'objet canalisation.</i>	269
H.5	<i>Détail de l'application de notre proposition du MCD pour Objet_I sur l'objet canalisation.</i>	270
I.1	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « MNT » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	271
I.2	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « plateforme existante » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	272
I.3	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « plateforme projet » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	273

I.4	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « bâtiment » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	274
I.5	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « récepteur acoustique » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	274
I.6	<i>Description du workflow suivi par un Objet_I « isophone » lors d'une étude acoustique. Il est possible ensuite de découper chaque action en plusieurs actions pour préciser les mécanismes de transformation de l'information.</i>	275
J.1	<i>Relations entre catégories d'exigences et Objet_I pour la préparation du dossier d'audit sécurité. Pour certains Objet_I et particulièrement pour les panneaux (directionnels, SAV ou de police), une dimensionnalité 3D est possible mais n'apporte que peu de choses pour la réponse aux exigences à cette phase d'étude.</i>	278
J.2	<i>Affectation des Objets_I aux Système pour la préparation du dossier d'audit sécurité. . . .</i>	279
J.3	<i>Découpage du projet avec une vue fonctionnelle pour l'audit de sécurité. Il n'est pas possible sur cette vue de dessiner l'ensemble des objets qui appartiennent à ces Système pour des questions de lisibilité. Nous ne présentons ici que certains Objet_I et les liens portent la mention appartient à. Le type de ligne des flèches n'a pas de sens particulier : il facilite par contre la lecture de cette figure.</i>	280
J.4	<i>Découpage du projet avec une vue organique pour l'audit de sécurité. Tout objet non spécifié comme Projet ou stéréotype « entité fonctionnelle » est un Objet_I. Les liens entre Entités fonctionnelles et Objet_I ne sont pas dessinés pour alléger la figure. Les rectangles jaunes indiquent les Objet_I traités dans la Figure J.3 qui appartiennent à plusieurs Système. D'autres Objet_I de cette figure font également partie de plusieurs systèmes et sont transversaux à plusieurs Entités fonctionnelles.</i>	281

Liste des tableaux

1.1	<i>Discontinuité des caractéristiques du « niveau de détail » selon la source de la donnée.</i> . . .	19
1.2	<i>Échelles considérées selon le type de données avec exemples d'analyses pour illustration.</i> . . .	20
3.1	<i>Dimensionnalités possibles des objets selon celle de l'univers. La partie de droite illustre les combinaisons possibles entre pictogrammes (possibilités identiques pour un univers 3D). Cet ensemble de tableaux est une synthèse graphique et comprend des éléments extraits de [Larrivée et al., 2006; Zoghلامي, 2013; PictograF, 2016].</i>	78
3.2	<i>Correspondance entre les pictogrammes des Univers 2D et 3D [Larrivée et al., 2006].</i>	78
5.1	<i>Analyse de 6 sous-concepts des LOD de CityGML (d'après une proposition de [Biljecki et al., 2014b]) avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.</i>	119
5.2	<i>Synthèse de notre interprétation de la proposition de Lowner et al. [2013] pour une distinction entre la géométrie et la sémantique dans la définition des LOD de CityGML avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.</i>	122
5.3	<i>Tableau des différentes définitions du concept de LODt (complété à partir du travail de [Volk et al., 2014]).</i>	127
5.4	<i>Exemple extrait de [BIMForum, 2015].</i>	131
5.5	<i>Analyse de 6 sous-concepts des LODt du PAS 1192 (LOD - LOI) avec mise en évidence de leur caractère implicite (-) ou explicite (+) (0 signifie que le concept n'est pas géré par le LOD ou LOI). On retrouve les résultats des LODt de BIMForum en faisant la somme de ces deux lignes.</i>	134
5.6	<i>Description des besoins pour les sous-concepts constitutifs des LODt selon deux exigences à traiter : le respect de la réglementation par le dimensionnement des protections acoustiques et la résolution des problèmes de coordination 3D via la détection de clashes entre le mur acoustique et les autres objets du modèle.</i>	135
5.7	<i>Synthèse de décomposition des sous-concepts des LOD de CityGML [Norme de CityGML, 2012], des LODt de BIM Forum [BIMForum, 2015], du couple LOD - LOI du [PAS 1192-2, 2013; Bsi, 2015] et des LODef et niveaux de détail de Communic [Communic L1, 2010], avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.</i>	143
6.1	<i>Répartition des sous-concepts dans les LOXi de notre proposition pour un MCD adapté aux projets d'infrastructures avec mise en évidence de leur caractère implicite ou explicite.</i> . . .	152
7.1	<i>Identification des besoins pour deux BIM uses différents dans le cadre de l'étude acoustique (les LOD évoqués ici sont ceux de CityGML, afin d'avoir une référence normalisée pour appuyer notre argumentation).</i>	183

7.2	Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 9 suite à simplification des univers du discours. Contrôle en Avant Projet (AVP).	189
7.3	Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 10 suite à simplification des univers du discours.	189
7.4	Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 20 suite à simplification des univers du discours.	190
7.5	Tableau des LOXi pour l'exigence SC - 21 suite à simplification des univers du discours.	190
7.6	Tableau des LOXi pour les exigences SC - 9 et SC - 20 citées ci-dessus suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)	192
7.7	Tableau des LOXi pour l'exigence de vérification du gabarit de passage des véhicules suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)	193
7.8	Tableau des LOXi pour l'exigence de visibilité entre panneau D32 et balise J14 (voir Figure 7.20) suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)	193
7.9	Tableau des LOXi pour l'exigence de coordination 3D suite à simplification des univers du discours. (Ce tableau ne traite que l'Objet_I Panneau de signalisation verticale parmi tous les Objets_I concernés par cette exigence.)	194
8.1	Proposition de tableau pour la synthèse des représentation des Objet_I pour chaque LOA. Ce tableau a vocation à être expérimenté et amélioré avec le traitement d'autres cas d'usage.	198
A.1	Correspondance de thèmes géométriques et sémantiques avec les LOD appliqués à l'objet bâtiment [Norme de CityGML, 2012]	244
A.2	Paramètres pour la répartition des objets par LOD d'après la Norme de CityGML [2012]. Nous avons choisi de conserver ce tableau en anglais afin de ne pas introduire de confusion dans la traduction des termes de la ligne 2 « Model scale description » dont les limites restent floues entre LOD.	244
B.1	Tableau comparatif des trois paradigmes de la conception, d'après Bot et Vitali [2011].	250
E.1	Élucidation des exigences (basé sur [Badreau et Boulanger, 2014]) du système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données ».	256
E.2	Identification des sources d'exigences (basé sur [Badreau et Boulanger, 2014]) pour le système « modèle de l'infrastructure et de sa base de données » dans un environnement BIM.	256