



HAL
open science

Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction

Conrad Boton

► To cite this version:

Conrad Boton. Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT : 2013LORR0014 . tel-01749337

HAL Id: tel-01749337

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749337>

Submitted on 29 Mar 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

Discipline Science de l'Architecture

Par Conrad Boton

Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service

Vers des multi-vues adaptées pour la simulation
collaborative 4D/nD de la construction

Directeur : **Gilles Halin**, Co-Directeur : **Sylvain Kubicki**

Soutenance publique le 20 mars 2013

Président	M. Thierry VERDEL	Professeur, Responsable du département Géoingénierie. HDR. École des Mines de Nancy (France)
Rapporteurs	M. Gilles VENTURINI	Professeur en Informatique. Responsable du groupe de recherche FOVEA, HDR Université de Tours (France)
	M. Jean-Jacques TERRIN	Architecte. Docteur en architecture, HDR, Professeur École Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles (France)
Examineurs	M. Bernard FERRIES	Maître Assistant associé en informatique École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse (France)
	M. Gilles HALIN	Maître de conférences en Informatique. Responsable scientifique du Laboratoire MAP-CRAI. HDR. Université de Lorraine (France)
	M. Sylvain KUBICKI	Architecte. Docteur en Sciences de l'Architecture. Chercheur au Centre de Recherche Public Henri Tudor (Luxembourg)
Invité	M. Koenraad NYS	Ingénieur Architecte. Consultant IT pour l'industrie de la construction. Managing Director à D-Studio (Belgique)

À ma mère...

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un peu plus de trois années de recherche au Centre de Recherche Public (CRP) Henri Tudor au Luxembourg et au Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI) en France. J'ai pu comprendre durant cette période qu'une telle recherche est avant tout un travail d'équipe. Je tiens donc à remercier toutes les personnes qui y ont contribué de près ou de loin.

Mes remerciements vont d'abord à Monsieur Sylvain Kubicki, Docteur en Sciences de l'Architecture et chercheur au CRP Henri Tudor, qui a cru en moi et qui a accepté de définir ce projet avec moi, de le codiriger et de m'encadrer au quotidien. Je lui exprime ici toute ma gratitude pour son implication, sa rigueur et la qualité du suivi.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Monsieur Gilles Halin, Maître de conférences en Informatique à l'Université de Lorraine et responsable scientifique du laboratoire MAP-CRAI, d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche. Son expérience, sa rigueur et ses qualités pédagogiques ont été déterminantes pour la réussite de ce projet.

J'ai une pensée spéciale pour Monsieur Laurent Grein, Vice-Président du CRTI-B, qui a été au début de cette expérience, et pour Carlo Kemp, Gestionnaire du patrimoine d'Etat à l'Administration des Bâtiments Publics du Luxembourg, qui le premier m'a accueilli. Qu'ils reçoivent ici le témoignage de toute ma reconnaissance.

Je remercie Monsieur Stephan Vassen, gestionnaire de projet et Site Manager chez Félix Giorgetti SÀRL, pour m'avoir donné l'occasion de réaliser l'étude de cas sur un de ses chantiers, pour le temps qu'il y a consacré, et pour son amitié.

Je pense à Messieurs Johny Thill, François Henrotte et Gualbert Gbéhounou qui, malgré leur agenda chargé, ont toujours su trouver du temps pour m'écouter et m'apporter leur appui.

Je remercie mon collègue de recherche, Daniel Zignale, dont le sujet de recherche s'inscrit dans la même thématique que le mien et avec qui j'ai pu, au quotidien, mener des discussions passionnantes et enrichissantes qui nous ont beaucoup aidés dans la génération et la structuration des idées.

Je remercie les autres collègues du CRP Henri Tudor et du laboratoire CRAI pour leur accueil et leur contribution. J'ai une pensée particulière pour Fabrice Absil, Architecte et Programme Manager au CRP Henri Tudor, dont l'expérience a été déterminante dans la réalisation de l'étude de cas. Je pense également à Madame Annie Guerriero, Architecte et Docteur en Sciences de l'Architecture, pour son esprit critique, son appui, ses conseils, et surtout l'excellent travail de relecture qu'elle a souvent fait dans le cadre de cette thèse.

Je remercie Monsieur Koenraad Nys, Managing Director à D-studio et Consultant IT indépendant pour l'industrie de la construction, pour avoir gracieusement mis à notre disposition une licence du plug-in Virtual Builder.

Je pense à ma famille et au soutien qu'elle m'a toujours apporté, alors même que j'ai décidé d'aller vers d'autres cieux, vers d'autres expériences. Vous êtes toujours là, dans mon cœur.

Je pense aussi, avec beaucoup d'amitié, à mes compagnons du *Club Room* du CRP Henri Tudor. Les parties de rigolade, de kicker, de fléchettes et de billard avec vous, sont pour moi des souvenirs inoubliables de moments magnifiques qui ont grandement contribué à mon équilibre.

Un grand merci à mes amis qui, de près ou de loin, n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter leur soutien inconditionnel. Je pense particulièrement à Clarence AFANOU, Camille SEKPE, Daladier YEKPON et à tous les autres.

Une mention spéciale à celle à qui j'ai demandé trois années d'attente et qui a accepté de m'attendre, quand bien même j'ai fait un peu plus que cette période prévue. Merci du fond de mon cœur.

Je remercie sincèrement les rapporteurs de la thèse pour leur disponibilité et la qualité de leurs rapports et de leurs suggestions. Il s'agit de M. Gilles Venturini, Professeur à l'université de Tours, et M. Jean-Jacques Terrin, Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles.

Je remercie également les examinateurs : M. Thierry Verdel, Professeur à l'École des Mines de Nancy ; et M. Bernard Ferriès, Maître Assistant à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse.

Je remercie enfin le Fonds National de la Recherche du Luxembourg qui a financé cette recherche.

Résumé

La planification est essentielle pour la réussite des projets d'Architecture, Ingénierie et Construction (AIC). La simulation 4D de la construction est une approche innovante qui s'inscrit dans le développement de la maquette numérique BIM. Elle associe un modèle 3D de l'ouvrage au planning des activités de manière à en simuler la réalisation à travers le temps. Plusieurs travaux ont montré que la simulation 4D est particulièrement intéressante pour la comparaison de la constructibilité des ouvrages et des méthodes de travail, pour l'identification des conflits et des chevauchements, mais aussi comme un outil de collaboration pour les différents acteurs afin de discuter et planifier l'avancement du projet.

La planification de la construction est aujourd'hui une activité nécessairement collaborative. Pourtant, l'usage collaboratif de la simulation 4D reste limité, notamment à cause du manque d'adaptation des vues manipulées. En effet, la plupart des outils 4D actuels, même s'ils proposent cette « simulation collaborative » comme argument commercial, se contentent de proposer les mêmes vues « standards » à tous les acteurs (3D associé au Gantt). Pourtant les méthodes de travail traditionnelles dans le secteur s'appuient sur différentes représentations visuelles (ex. plans 2D, modèle 3D « blanc », modèle 3D « photoréaliste », tableaux de quantités) que les professionnels ont l'habitude de choisir en fonction de leurs besoins particuliers.

L'hypothèse de cette recherche doctorale considère que les vues proposées dans les outils de simulation collaborative 4D devraient être adaptées aux besoins de chacun des acteurs impliqués. L'objectif est de proposer une méthode de conception de vues multiples adaptées aux réels besoins métiers des participants à une simulation collaborative 4D. À cet effet, la recherche étudie les pratiques de planification dans le secteur de la construction, les théories de visualisation de l'information et de conception de vues, ainsi que le travail collaboratif assisté par ordinateur.

La proposition définit d'abord une conceptualisation originale de la simulation collaborative 4D de la construction. Elle se traduit ensuite par une structuration des besoins pour l'adaptation des vues, et une méthode structurée pour la composition de vues multiples 4D adaptées aux besoins de différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative. Des métamodèles sont également

conçus et fournissent aux utilisateurs de la méthode un langage structuré pour la conception progressive des multi-vues 4D.

L'approche méthodologique propose dans un premier temps de définir le problème « métier » sur base d'une revue de la littérature et d'entretiens avec des professionnels. Puis, un recul théorique dans le champ de la visualisation d'information et du travail coopératif assisté par ordinateur conduit à formaliser des métamodèles initiaux de situation collaborative, de tâches de visualisation, de vues métiers et de vues multiples coordonnées. Ces métamodèles sont ensuite confrontés à des visualisations 4D réelles déjà produites dans le cadre de projets de construction, afin d'affiner progressivement leur contenu ainsi que la cohérence des étapes de la méthode. Enfin, une expérimentation finale développe et valide la méthode dans son ensemble. Elle est complétée d'une enquête auprès de professionnels afin de valider les résultats obtenus.

Mots-clés : Construction, Collaboration, Simulation, CAO 4D, Visualisation, Vues métiers, Science de la conception, Interface Homme-Machine

Abstract

Planning is crucial for the success of Architecture, Engineering and Construction (AEC) projects. 4D construction simulation is an innovative approach that is in line with the development of Building Information Modeling (BIM). It combines a 3D model of the building to the planning of activities in order to simulate its realization over time. Several studies have shown that 4D simulations are particularly useful for comparing the constructability of structures and working methods for the identification of conflict and overlap, but also as a collaborative tool for stakeholders to discuss and plan the project progress.

The construction planning is nowadays necessarily collaborative. However, the use of collaborative 4D simulation is still limited, mainly because of the lack of adaptation of views proposed to users. Indeed, most current 4D tools, even if they offer this "collaborative simulation" as sales argument, simply offer the same "standard" views (3D + Gantt chart) to all users. Yet traditional working methods in the sector rely on different visual representations (eg, 2D drawings, 3D model, "white" 3D model, "photorealistic" model, quantities table) that professionals usually choose according to their specific needs.

The hypothesis of this doctoral research considers that the views proposed in 4D collaborative simulation tools should be adapted to the needs of each stakeholder involved. The objective is to propose a method to design 4D multiple views adapted to the real business needs of participants in a collaborative 4D simulation. Thus, the research examines planning practices in the construction sector, and theories from Information Visualization, views design, and Computer-Supported Collaborative Work fields.

The proposal firstly defines an original conceptualization of collaborative 4D construction simulation. It then translates into a structuration of views adaptation needs, and a structured approach to design 4D multiple views adapted to different stakeholders in a 4D collaborative simulation. Metamodels

are also proposed and provide method users with a structured language for the progressive design of 4D multi-views.

The methodological approach proposes first to identify the "business" issue relying on a literature review and interviews with professionals. Then, a decrease in the theoretical field of Information Visualization and Computer-Supported Cooperative Work led to formalize initial metamodels of collaborative situation, of visualization tasks, of business view and coordinated multiple views. These metamodels are then confronted with real 4D visualizations from construction projects to progressively refine their content and the consistency of the proposed method. A final experiment develops and validates the method as a whole. It is complemented by a survey with professionals in order to validate the results.

Keywords: Construction, Collaboration, Simulation, 4D CAD, Visualization, Business Views, Design Science, Human-Computer Interface

Sommaire

INTRODUCTION	17
Le contexte du travail	17
La problématique de recherche	18
Le plan de la thèse	19
1 PLANIFICATION DES PROJETS DE CONSTRUCTION : PRATIQUES ET ENJEUX	27
1.1 Gestion des projets de construction et importance de la planification	27
1.1.1 Gestion de projet : quelques concepts de base	28
1.1.2 Particularités des projets de construction	30
1.1.3 Les facteurs de succès d'un projet de construction	37
1.2 La planification de la construction et la simulation 4D/nD de la construction	42
1.2.1 Qu'est-ce que la planification de la construction ?	42
1.2.2 La multiplicité dans la planification de la construction	49
1.2.3 Les méthodes de planification de la construction	55
1.3 Bilan du chapitre	65
2 LA SIMULATION 4D/ND POUR PLANIFIER LA CONSTRUCTION : UN BESOIN DE COLLABORATION ET DE VUES ADAPTEES	69
2.1 La simulation 4D de la construction	69
2.1.1 Qu'est-ce que la simulation 4D ?	69
2.1.2 Les aspects de la construction pris en charge par la simulation 4D/nD	76
2.1.3 Principaux outils logiciels et domaines d'application	80

2.2	Problématique, travaux similaires et approche de recherche	87
2.2.1	Besoin d'adaptation de la visualisation dans la simulation collaborative 4D/nD de la construction	87
2.2.2	Quelques travaux de recherche similaires	89
2.2.3	Méthodes d'ingénierie des IHMs pour la conception d'interfaces adaptées	95
2.2.4	Une approche inspirée des méthodes de la science de la conception	99
2.3	Bilan du chapitre	103
3	THEORIES DE VISUALISATION DE L'INFORMATION ET DE VUES MULTIPLES COORDONNEES	109
3.1	Visualisation et représentations visuelles	109
3.1.1	Définitions et principes de base	109
3.1.2	Représentations visuelles et vues en visualisation de l'information	114
3.1.3	La création de représentations visuelles	122
3.2	Les vues multiples coordonnées	127
3.2.1	L'utilisation de vues multiples	127
3.2.2	Les règles d'utilisation des vues multiples	131
3.2.3	Coordination des vues multiples	134
3.3	Bilan du chapitre	140
4	TRAVAIL COLLABORATIF ASSISTÉ PAR ORDINATEUR ET VISUALISATION COLLABORATIVE	145
4.1	Le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO)	145
4.1.1	Définitions, approches et dimensions	145
4.1.2	Classifications des systèmes de TCAO	149
4.1.3	Nouvelles approches de description du travail collaboratif	155
4.2	La visualisation collaborative	160
4.2.1	Définitions et principaux concepts	160
4.2.2	Les systèmes de visualisation collaborative	165
4.3	Bilan du chapitre	167
5	CONCEPTUALISATION DE LA NOTION DE SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND ET RAFFINEMENT DE LA PROBLEMATIQUE	173
5.1	Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD	173
5.1.1	La simulation	173
5.1.2	Collaboration et coopération dans le secteur de la construction	177
5.1.3	La simulation collaborative 4D/nD de la construction	180
5.2	Raffinement de la problématique et approche de recherche	188
5.2.1	Notre problématique par rapport aux théories du TCAO	188
5.2.2	Notre problématique par rapport aux théories de visualisation	191

5.3	Bilan du chapitre	194
6	METHODE DE CONCEPTION DE VUES MULTIPLES ADAPTEES DANS LE CADRE DE LA SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND DE LA CONSTRUCTION	197
6.1	Une méthode de conception de vues multiples nD adaptées	197
6.1.1	Positionnement de la méthode proposée	197
6.1.2	Méthode de conception de vues multiples nD adaptées	201
6.2	Métamodèles supportant la méthode	209
6.2.1	Le métamodèle de situation collaborative	209
6.2.2	Le métamodèle de tâches de visualisation	213
6.2.3	Le métamodèle de vue métier	217
6.2.4	Le métamodèle de vues multiples coordonnées	221
6.2.5	Utilisation de la méthode	225
6.3	Bilan du chapitre	229
7	APPLICATION A LA SIMULATION 4D DE LA CONSTRUCTION ET VALIDATION DE LA METHODE PROPOSEE	233
7.1	Étude de cas sur un chantier réel	233
7.1.1	Le contexte de l'étude de cas	233
7.1.2	Application de la méthode proposée	235
7.2	Intérêt des vues proposées	251
7.2.1	Protocole d'enquête	251
7.2.2	Résultats de l'enquête	253
7.3	Discussions et bilan du chapitre	260
	CONCLUSION	263
	La problématique	263
	L'apport original	264
	Limites et perspectives de la recherche	266
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	271
	GLOSSAIRE	283
	INDEX DES TERMES	289
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	291

Liste des abréviations

AFITEP	Association Francophone de Management de Projet
AFNOR	Association française de normalisation
BIM	Building Information Modeling
BSCW	Be Smart – Cooperate Worldwide
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CIFE	Centre for Integrated Facility Engineering
CMV	Coordinated Multiple Views
COVISE	Collaborative Visualization and Simulation Environment
CPM	Critical Path Method
CVR	Collaborative Virtual Reality environments
GDSS	Group Decision Support System
HSL	Hue, Saturation and Lightness
IAI	International Alliance for Interoperability
IDM	Ingénierie Dirigée par les Modèles
IFC	Industry Foundation Classes
IHM	Interface Homme-Machine / Interaction Homme-Machine
ISO	International Organization for Standardization
IV	Information Visualization

IVI	Interactive Virtual Interface
KPI	Key Performance Indicator
LOB	Line Of Balance
LPS	Last Planner System
LSM	Linear Scheduling Method
MPOG	Multi-Player Online Game
MUE	Multi-User Enabling application
MUVR	Multi-User Virtual Reality environment
MVD	Model View Definition
OMG	Object Management Group
PBS	Product Breakdown Structure
PERT	Programme Evaluation and Review Technique
PMI	Project Management Institute
PSE	Problem-Solving Environment
RAVE	Resource-Aware Visualization Environment
RDP	Remote Desktop Protocol
SADT	Structured Analysis and Design Technic
SOA	Service Oriented Architecture
TCAO	Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur
TOC	Theory Of Constraints
TSSM	Time Space Scheduling Method
UML	Unified Modeling Language
VCE	Virtual Construction Environment
VNC	Virtual Network Computing
VPM	Vertical Production Method
VRE	Virtual Reality Environment
WBS	Work Breakdown Structure
WWP	Weekly Work Plan
WYSIWIS	What You See Is What I See

Introduction

Le contexte du travail

Le travail de recherche ayant conduit à la présente thèse a été mené au Centre de Recherche Henri Tudor à Luxembourg et au Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI) à Nancy, sous la direction du Dr Gilles Halin et la co-direction du Dr Sylvain Kubicki. Il se place dans la droite ligne d'autres thèses réalisées ces dernières années dans le domaine des Sciences de l'Architecture. Au nombre de ces thèses, nous pouvons citer :

- la thèse d'Olivier Malcurat sur la spécification d'outil informatique pour assister le travail collaboratif dans les projets de construction (Malcurat 2002). Dans ce travail, il considère le secteur de la construction comme étant « un champ d'application complexe et original » de théories de TCAO, et propose une spécification de collecticiel, accompagnée d'un modèle d'interface et un modèle logique. Il réalise une validation théorique sur la base d'un exemple réel d'opération urbaine.
- la thèse de Damien Hanser portant sur la proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, avec application au domaine du bâtiment (Hanser 2003). Dans cette thèse, Hanser propose une première version du modèle de coopération en introduisant notamment les classes « acteur », « document » et « activité ». Le prototype Bat'Map qu'il présente permet la visualisation d'un contexte de l'activité de construction sous forme d'hypermédia adaptatif.
- la thèse de Sylvain Kubicki qui redéfinit le contexte de l'activité collective dans le secteur de la construction, à travers le concept d'ingénierie coopérative dans lequel il introduit la notion de coordination flexible de l'activité de construction (Kubicki 2006). Il propose d'intégrer les vues métiers par l'utilisation d'une infrastructure de modèles, et le prototype Bat'iViews qu'il présente est une interface multi-vues permettant de naviguer dans le contexte de coopération.
- la thèse d'Annie Guerriero sur la représentation de la confiance dans l'activité collective, dans laquelle elle effectue un rapprochement entre les théories sur la confiance et les

outils d'assistance à la coordination (Guerriero 2009). Elle présente notamment le prototype Bat'iTrust destiné aux coordinateurs-pilotes de l'activité de chantier.

Sur le plan de la thématique, nous positionnerons davantage ce travail dans la lignée de celui de Kubicki (2006) dont la problématique spécifique se rapproche plus de nos questionnements de recherche. Mais tout en restant dans la logique de ces différents travaux, nous apporterons, dans la manière d'aborder le secteur de la construction, un regard quelque peu différent qui peut s'expliquer par notre profil qui diffère de celui de nos prédécesseurs. Ce regard est influencé par la double casquette vers laquelle nous oriente notre formation en ingénierie civile et en management de projet.

La problématique de recherche

Comme le montrent bien les travaux auxquels succède notre recherche, la problématique générale consiste à comprendre le contexte d'une activité collective de construction en vue d'adapter les outils (logiciels) aux besoins des acteurs. Il s'agit d'une tâche particulièrement difficile au regard des caractéristiques du secteur. Parmi ces caractéristiques, nous pouvons rappeler très brièvement (avant d'y revenir plus tard, dans le premier chapitre) le fait que chaque projet de construction met en place un contexte particulier et toujours différent, la fragmentation caractérisant le secteur, et le fait que l'environnement dans lequel se déroule un projet de construction (par exemple le contexte physique, les juridictions légales, les conditions du marché, les mécanismes de gestion) est différent à chaque opération et en constant changement.

Tout cela rend extrêmement difficile, voire inefficace, l'utilisation des théories générales sur le travail coopératif. Les travaux présentés plus haut rendent bien compte de cet état de fait et constituent autant de jalons importants dans la proposition de modèles et de méthodes de support au travail coopératif dans le secteur de l'architecture et la construction, ainsi que de visualisation du contexte d'une activité collective. Les travaux de Kubicki (2006) et de Guerriero (2009) ont bien montré que pour la visualisation du contexte d'une activité collective dans le secteur de la construction, l'utilisation de plusieurs vues complémentaires est nécessaire pour répondre aux besoins des utilisateurs. L'adaptation des outils aux besoins des acteurs devrait donc impliquer aussi le choix judicieux de ces vues et les faire correspondre à celles traditionnellement utilisées par les professionnels du secteur.

Par ailleurs, au début des années 1990, les différents travaux sur la normalisation de la modélisation des produits de construction ont permis à l'IAI de développer une spécification neutre et orientée objet pour faciliter l'interopérabilité entre les outils logiciels de CAO. Il s'agit du standard IFC (*Industry Foundation Classes*), enregistré ISO/PAS 16739. Ce standard est devenu une partie intégrante de l'approche BIM (*Building Information Modeling*), dont l'objectif principal est d'améliorer les représentations bidimensionnelles traditionnelles du bâtiment (plans, sections, coupes, etc.) avec de l'information tridimensionnelle et d'autres paramètres relatifs aux objets de l'ouvrage à construire (par exemple, composants, propriétés structurales, résistance au feu). Il s'agit également de favoriser la collaboration entre différents experts impliqués dans le processus de conception et de construction (architectes, ingénieurs, maîtres d'ouvrages, etc.). Ainsi, au-delà de la modélisation des ouvrages, le BIM recommande la définition de processus de travail, le principe

étant d'uniformiser et de mieux gérer les diverses expertises et les décisions durant le déroulement de la conception et la construction. En 2012, l'association BuidingSMART et plusieurs éditeurs de logiciel de CAO ont lancé l'initiative OpenBIM¹. Il s'agit d'une campagne de marketing à l'égard des professionnels visant à accroître la visibilité du BIM ainsi que des processus intégrés.

La planification de la construction est une activité capitale dans les projets de construction. Il s'agit, lorsqu'elle est bien conduite, d'une activité très collective impliquant plusieurs acteurs aux besoins différents, utilisant diverses méthodes et des modes de représentation différents. La simulation 4D constitue une approche innovante de planification, de plus en plus adoptée dans le secteur, particulièrement pour des projets d'envergure. La simulation 4D, dont les recherches ont émergé dans les années 1990 à l'université de Stanford, associe une représentation 3D de l'ouvrage à réaliser au planning d'exécution, de manière à simuler la construction dans le temps. L'apport de l'utilisation collaborative de la simulation 4D/nD, notamment facilitée par les avancées du BIM, a été démontré et est souvent utilisé comme argument commercial par les éditeurs d'outils logiciels. Dans le cadre de cette utilisation collaborative, les vues « génériques » proposées à tous les participants ne semblent pas correspondre aux besoins de tous. Il faut rappeler que chacun, en fonction de son rôle, a des besoins d'information particuliers. Le choix des vues proposées dans les outils de simulation collaborative 4D/nD devrait donc tenir compte de ces besoins, reposer sur les habitudes de représentation des acteurs correspondant à leurs différents besoins, tout en tirant parti des possibilités offertes par les nouveaux dispositifs de visualisation.

L'objectif de la présente thèse est de proposer une méthode de conception de vues basées sur les besoins métiers des utilisateurs. Une telle méthode appliquée à la simulation collaborative 4D permettrait de composer des multi-vues adaptées aux besoins particuliers de chaque acteur.

Le plan de la thèse

Nous articulons notre argumentation à travers trois grandes parties :

Partie 1 – La planification de la construction et le besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD. Cette partie est divisée en deux chapitres :

- Le **chapitre 1** met en évidence l'importance de la planification de la construction, en partant de généralités sur la gestion de projets et des particularités du secteur de la construction. Il recense notamment les indicateurs et les facteurs de succès des projets de construction, pour faire ressortir la fonction managériale déterminante que représente la planification dans ces projets.

Ensuite, la planification de la construction est présentée à travers des questions pragmatiques telles que : pourquoi planifier ? Que planifie-t-on ? Qui planifie ? Quel est le meilleur moment pour planifier ? Ce chapitre présente enfin les méthodes et les outils (logiciels) utilisés dans le secteur pour la planification de la construction. Parmi ces méthodes et outils, la simulation 4D apparaît comme une bonne innovation, permettant de visualiser en même temps que le planning, une représentation spatiale de l'ouvrage à construire.

¹ www.openbim.org

Le **chapitre 2** revient sur la simulation 4D pour le support à la planification collaborative de la construction. Il présente, dans un premier temps, les principes fondamentaux de la CAO 4D, son intérêt dans le secteur de la construction, les principaux outils de simulation 4D, les domaines d'application actuels, et le passage de la simulation 4D vers la simulation nD. Le lien important entre simulation et visualisation est ensuite évoqué et la notion de « vues métiers » est introduite.

Dans la deuxième partie du chapitre, l'hypothèse principale et l'objectif de la recherche sont présentés, de même que les travaux similaires et notre approche de recherche inspirée de la science de la conception.

Partie 2 – Un recul théorique sur la visualisation et le travail coopératif assisté par ordinateur. Ce recul se fait en deux chapitres :

- Le **chapitre 3** fait un recul vers les théories de visualisation de l'information et des vues multiples coordonnées. Il s'agit notamment de comprendre les aspects cognitifs de la visualisation, la perception et la mémoire. Il s'agit également d'étudier le processus de création de représentation visuelle, les questionnements et critères pour une bonne représentation visuelle, et les interactions et les tâches de visualisation.

La deuxième partie de ce chapitre étudie les vues multiples et les mécanismes utilisés pour leur coordination. Cette partie cherche la réponse aux questions fondamentales sur l'utilisation des vues multiples (quand les utiliser, les dimensions, etc.) et présente les règles d'utilisation, les théories et autres modèles sur les vues multiples coordonnées.

- Le **chapitre 4** fait également un recul théorique, mais sur le travail coopératif assisté par ordinateur et la visualisation collaborative. Le travail coopératif assisté par ordinateur y est abordé de manière à y retrouver des notions intéressantes pouvant nous aider dans notre démarche. Les principales définitions, les classifications classiques, et les nouvelles approches sont donc étudiées.

La visualisation collaborative se rapporte à un champ de recherche à la frontière entre la visualisation et le travail coopératif assisté par ordinateur. La deuxième partie de ce chapitre étudie ses définitions et ses principaux concepts, ainsi que les systèmes de visualisation collaborative. Les situations de visualisation collaborative sont présentées et le lien entre notre problématique et ce domaine scientifique est abordé.

Partie 3 – Notre proposition, présentée en trois chapitres :

- Le **chapitre 5** qui consiste en un effort de conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD. Une telle conceptualisation se base sur une bonne compréhension des éléments théoriques sur la simulation, la collaboration dans le secteur de la construction. Cela permet non seulement de proposer une définition pertinente au concept, mais aussi et surtout d'identifier les notions principales à traiter, de manière à raffiner notre problématique.

Le raffinement de la problématique nous conduit à mieux nous positionner par rapport aux théories de visualisation et de travail collaboratif, et aussi par rapport aux travaux antérieurs dans le domaine de l'architecture, l'ingénierie et la construction.

Le **chapitre 6** présente la méthode que nous proposons pour concevoir des vues 4D/nD adaptées aux réels besoins des différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D/nD. À cet effet, il positionne d'abord cette proposition par rapport aux travaux antérieurs du laboratoire CRAI et par rapport aux autres travaux portant sur l'amélioration des vues 4D/nD dans le secteur de la construction. La méthode proposée est alors décrite en détail à travers ses étapes et l'approche de modélisation utilisée pour son utilisation, basée notamment sur les recommandations de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Ensuite, les différents métamodèles proposés comme support aux différentes étapes de la méthode sont décrits. Pour chaque métamodèle, le processus itératif ayant conduit à sa construction (y compris sa consolidation et sa validation) est exposé.

- Le **chapitre 7** présente une application de la méthode à un cas réel de simulation 4D de la construction sur un chantier au Luxembourg, et les résultats d'une expérimentation menée pour valider les vues adaptées proposées. Dans un premier temps, l'étude de cas est présentée à travers notamment son contexte, les acteurs impliqués et son déroulement. L'application de la méthode au cas étudié permet de décrire la situation collaborative, les besoins de visualisation des différents acteurs, le mécanisme de choix des vues métiers adaptées, et la composition de vues multiples 4D appropriées. Ces vues sont ensuite soumises à l'appréciation de professionnels du secteur dans le but d'en évaluer la pertinence et l'intérêt. La deuxième partie de ce chapitre rend compte de cette démarche de validation et discute les résultats obtenus.

Première partie :

La planification de la construction et le besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD

Contenu :

Chapitre 1 : Planification des projets de construction : pratiques et enjeux

Chapitre 2 : La simulation 4D/nD pour la planification de la construction : un besoin de collaboration et de vues adaptées

CHAPITRE 1 :

PLANIFICATION DES PROJETS DE CONSTRUCTION : PRATIQUES ET ENJEUX



*"It pays to plan ahead.
It wasn't raining when Noah built the ark."*

Peter F. Drucker

1 Planification des projets de construction : pratiques et enjeux

Dans ce chapitre, nous abordons la planification de la construction, en prenant soin de présenter d'abord quelques notions générales sur la gestion de projet. Nous identifions ensuite les particularités des projets de construction et leurs facteurs de succès, de manière à comprendre que la planification tient un rôle essentiel dans ces projets. Dans un second temps, les pratiques de planification dans le secteur sont présentées. L'accent est notamment mis sur les buts de la planification, les méthodes utilisées et les acteurs impliqués.

1.1 Gestion des projets de construction et importance de la planification

Cette section présente un aperçu des principes et définitions de base liés à la notion de projet avant d'identifier les particularités des projets de construction. Ainsi, l'importance de la planification sera plus aisément mise en évidence. La notion de projet de construction que nous évoquons ici ne correspond pas tout à fait à celle de projet architectural, développé notamment dans la thèse de Hanser (Hanser 2003). En effet, si ces deux types de projet correspondent à un besoin de réalisation ou d'édification du même type d'ouvrage, le projet architectural se positionne autour de l'aspect conceptuel (conception de l'ouvrage, réalisation des plans d'architecture) tandis que le projet de construction, tel que nous l'entendons, intègre tous les aspects liés à l'édification de l'ouvrage, depuis les études préliminaires jusqu'à la mise en service. Un projet architectural peut donc être compris comme étant la partie intégrante d'un projet de construction relative au rôle de concepteur joué par l'architecte. L'intérêt de la conception collaborative comme levier d'innovation dans le projet architectural a d'ailleurs été illustré récemment par Terrin (Terrin 2009). En ce qui nous concerne, nous parlerons dans la suite du présent mémoire de projet de construction, dans un sens plus global s'étalant sur plusieurs phases et impliquant différents rôles et divers types d'acteurs.

1.1.1 Gestion de projet : quelques concepts de base

1.1.1.1 Généralités sur la notion de projet et la gestion de projet

La gestion de projet se définit généralement comme étant une démarche dont le but est d'organiser le bon déroulement d'un projet. Il s'agit, selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR), d'une « fonction dont l'objectif essentiel est d'apporter, à la direction de projet, un ensemble d'informations analysées dans le but d'assurer la pertinence et l'opportunité de ses décisions » (AFITEP-AFNOR 2010). Il est précisé qu'il s'agit d'un « ensemble des méthodes, outils d'évaluation, de planification et d'organisation permettant d'atteindre les objectifs du projet en respectant les contraintes de performance, de délai, et de coût ». La gestion de projet est considérée comme faisant partie d'une fonction plus large appelée le management de projet. En effet, il est généralement admis que la gestion de projet correspond aux « fonctions instrumentales du pilotage d'un projet » tandis que le management de projet inclut « la gestion de projet et la fonction de direction de projet, en charge de la définition des objectifs » (Carel 2003).

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) définit le projet comme étant « un processus unique, qui consiste en un ensemble 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 coûts et de ressources » (Norme ISO 1006). Cette définition est assez proche de celle de l'AFNOR pour qui un projet est un « ensemble 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 » (Norme AFNOR X50-115). Le groupe de travail ECOSIP² considère le projet comme étant une « création collective, organisée dans le temps et l'espace, en vue d'une demande » (Giard & Midler 1994). Dans la même logique, Bourgeois estime qu'un projet est « un ensemble coordonné de tâches techniques, administratives et financières, destiné à concevoir, développer et réaliser un produit ainsi qu'à préparer son utilisation » (Bourgeois 1997). Selon cet auteur, le projet se caractérise par le fait qu'il vise à satisfaire un besoin particulier et spécifique, qu'il a un objectif autonome, et qu'il a un caractère novateur. Pour Giard et Midler, le projet « se caractérise à la fois par un ensemble de spécifications techniques, par un délai de réalisation et par un budget ; la définition du projet et de son suivi doit prendre en compte simultanément ces trois dimensions » (Giard & Midler 1994).

À la lecture de ces différentes définitions, il est facile de remarquer que :

- l'objectif est important dans un projet et il traduit l'existence d'un besoin ;
- un projet se décline en un ensemble d'activités ;
- ces activités ont un caractère collectif et coordonné : « un projet fait intervenir des disciplines multiples étrangères les unes aux autres, dont il faut coordonner les activités parfois contradictoires » (Bourgeois 1997) ;
- les notions de contrainte et de qualité sont très importantes ;
- les dates de début et de fin ainsi que le budget, qui sont aussi des contraintes, sont essentiels.

² [<http://rad2000.free.fr/ecosip01.htm>], consulté le 11/06/2012.

De manière plus pragmatique, un projet peut être décrit par des dates de début et de fin ainsi qu'un budget alloué. Il vise un objectif, mobilise plusieurs ressources matérielles, est réalisé par une équipe projet, et peut se décomposer en plusieurs lots d'activités. Des acteurs différents pourront alors être responsables des activités à réaliser et produiront des livrables qui sont des étapes importantes dans l'atteinte des objectifs du projet. La Figure 1 présente un modèle UML résumant ces différentes notions.

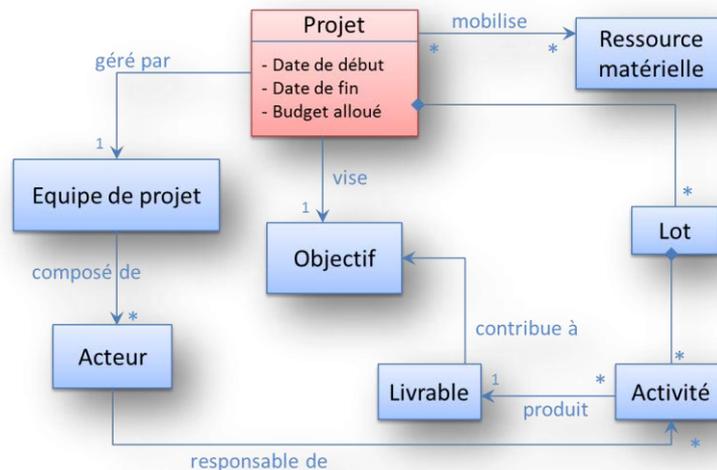


Figure 1 : Principales notions d'un projet

Il est important de distinguer un projet d'un processus continu et répétitif comme c'est souvent le cas dans l'industrie (automobile, aéronautique, etc.). En effet selon Giard et Midler (Giard & Midler 1996), un projet est aussi caractérisé par :

- une démarche finalisée par un but et fortement contrainte ;
- une prise en compte de la singularité de la situation ;
- une affaire de communication et d'intégration de différentes logiques ;
- un processus d'apprentissage dans l'incertitude ;
- une convergence dans une temporalité irréversible ;
- un espace ouvert et fluctuant.

1.1.1.2 Quelques définitions

Le modèle de la Figure 1 fait ressortir certains termes que nous jugeons utile de définir avant d'aller plus loin, de manière à permettre une lecture aisée de la suite du présent mémoire.

L'**objectif** du projet est le « but à atteindre, exprimé en termes mesurables et quantifiés. [...] L'atteinte de l'ensemble des objectifs correspond à l'exécution complète du projet et à sa réussite. [...] Les objectifs d'un projet se déclinent en objectifs de coûts, de délais, de performances techniques, de risques, etc., en vue de satisfaire le client » (AFITEP-AFNOR 2010). Le projet fait appel à des activités. L'**activité** est définie par l'AFITEP comme un « ensemble de tâches qui consomment du temps et des ressources, et dont l'exécution est nécessaire pour obtenir, ou contribuer à, la réalisation d'un ou de plusieurs résultats ». Une activité se caractérise par une date de démarrage,

une durée d'exécution, une date de fin et une consommation de ressources pouvant être matérielles humaines ou financières. On entend par **ressources** les consommables nécessaires à la réalisation d'une tâche. Le temps n'est pas considéré comme étant une ressource. Les ressources ont un coût d'utilisation et un taux de disponibilité et peuvent être humaines, matérielles, logicielles ou financières. On parle de ressource type pour désigner une ressource d'ordre générique comme un profil de personne, un type de matériel. Lorsque la ressource est identifiée (personne, matériel numéroté, etc.), on parle de ressource nominative (AFITEP-AFNOR 2010). Les **lots** sont le résultat de l'allotissement (ou lotissement dans certaines littératures) consistant à découper les activités en plusieurs ensembles cohérents à affecter à des entreprises différentes. Les lots de travail constituent par exemple un élément contractuel important dans le secteur de la construction, car ils y définissent le travail à réaliser et entrent dans la constitution des contrats.

Selon l'AFNOR, un **livrable** est un « résultat, vérifiable et/ou mesurable, qui doit être produit et validé au cours et/ou à la fin du projet, nécessaire à la poursuite ou à l'achèvement du projet. [...] Les livrables peuvent être des équipements, des documents (plan, réquisitions, dossier d'ingénierie, etc.), des prestations (formations, assistance, etc.), par exemple » (AFITEP-AFNOR 2010). Une **tâche** est un « ensemble d'opérations dont l'exécution est nécessaire pour obtenir un ou plusieurs livrables » (AFITEP-AFNOR 2010). La tâche est dite critique lorsqu'on ne dispose d'aucun degré de liberté dans son ordonnancement et que tout retard pris conduit à un retard correspondant sur la date de fin du projet. Elle est donc située sur le chemin critique. **Le chemin critique** est le chemin du réseau d'un projet « constitué d'un enchaînement de tâches dites critiques, dont la somme des durées représente la durée totale incompressible du projet » (AFITEP-AFNOR 2010). La détermination du chemin critique du projet se fait après l'ordonnancement qui est une notion de gestion opérationnelle du projet consistant à attribuer une date de début et une date de fin à chaque activité du projet. Il intervient à la fin de la planification lorsque les activités et les relations et interrelations entre elles ont été identifiées.

Ayant pris connaissance de ces quelques notions de base en gestion de projet, nous pouvons nous intéresser au cas particulier des projets de construction afin de comprendre ce qui, exactement, les différencie des autres types de projet. Ceci nous amènera à chercher une définition et des caractéristiques propres à la gestion de projet de construction, mais également à identifier des facteurs clés de réussite d'un projet de construction.

1.1.2 Particularités des projets de construction

Même si l'industrie de la construction est considérée comme étant l'une des toutes premières à fonctionner sur la base de projets, le terme « projet » revêt un sens particulier lorsqu'il est utilisé dans le domaine de la construction. Selon Austin et *al.* (2001), il désigne aussi bien le travail entrepris pour atteindre des objectifs spécifiques que la relation entre les personnes ou les groupes impliqués dans la prestation. Dans le cadre du présent mémoire, nous considérons le projet de construction comme étant la réalisation collective, organisée dans le temps et l'espace, en vue de réaliser une construction. Pour bien comprendre par la suite les caractéristiques des projets de construction, il nous semble utile d'aborder d'abord brièvement l'organisation et le fonctionnement du secteur de la construction lui-même.

1.1.2.1 Le secteur de la construction

Selon Rußig et *al.* (1996) cité par Sunke, le secteur de la construction est la partie de l'économie qui regroupe les activités relatives à la conception, la construction, l'entretien et l'utilisation ainsi que de la modulation, la modification et la démolition (ou la déconstruction) des constructions (Sunke 2009). Il s'agit d'un secteur majeur des économies des pays, avec un impact social, économique et écologique important.

Un ouvrage construit a un cycle de vie généralement décomposé en plusieurs phases. Plusieurs découpages existent et proposent des portées plus ou moins différentes de ces phases (Armand 2000; Neufert 2002). En ce qui nous concerne, nous considérons quatre phases :

- la phase pré-projet (montage, faisabilité, recherche de financement) ;
- la pré-construction (conception, allotissement, attribution des lots, préparation de chantier) ;
- la construction (réalisation de l'ouvrage) ; et
- la phase post-construction (réception, exploitation, réhabilitation ou démolition selon le cas).

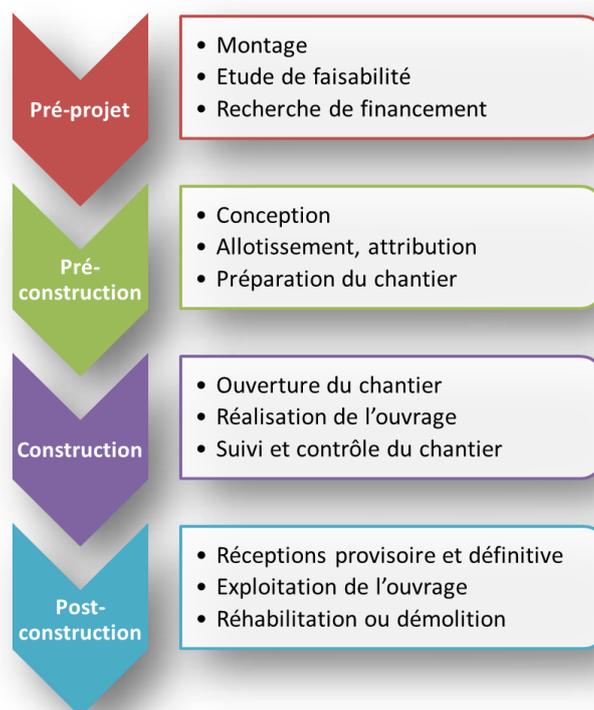


Figure 2 : Principales étapes d'un projet de construction

Plusieurs acteurs y jouent différents rôles. Parmi ces acteurs, nous pouvons citer les **maîtres d'ouvrages** qui sont au début d'un projet de construction en ce sens qu'ils vont monter l'opération de construction par l'acquisition du terrain, la définition du programme de l'ouvrage à construire, le financement ainsi que le recrutement d'un maître d'œuvre. Les **maîtres d'œuvre** sont généralement des architectes ou des cabinets d'architecture chargés de concevoir l'ouvrage à réaliser, en proposant une « réponse architecturale, technique et économique au programme du maître

d'ouvrage » (Kubicki 2006). La maîtrise d'œuvre associe des ingénieurs, des consultants et autres spécialistes en fonction du type et des exigences de l'ouvrage. Des **entreprises** sont chargées de la réalisation des travaux de construction. Ces travaux, qui se déroulent sur un chantier de construction, font appel à différents corps de métiers (terrassement, gros-œuvre, charpente, couverture, isolation, peinture, etc.) travaillant dans des configurations contractuelles qui peuvent varier (entreprise générale, sous-traitance, co-traitance, etc.). Un **coordinateur-pilote** coordonne le travail des différents corps de métier. L'étendue de sa mission et de ses responsabilités peut varier en fonction des contextes juridiques des pays (Guerrero 2009). Un **gestionnaire de patrimoine** peut être responsable de la vie de l'ouvrage et, avec les nouvelles problématiques liées à la construction durable, son rôle peut commencer dès la définition du programme afin d'anticiper les enjeux liés à la gestion du coût du cycle de vie de l'ouvrage. Les **fournisseurs** et autres industriels jouent également un rôle important en ce sens qu'ils vont approvisionner le chantier en matériaux, matériels et autres. Il convient d'ajouter à cette liste d'acteurs, les **administrations** comme le cadastre, les municipalités qui vont délivrer les différentes autorisations (permis de construire, autorisation d'ouverture de chantiers, autorisation d'occupation des voies, etc.) nécessaires à la bonne marche des activités de construction. La Figure 3 donne une idée très simplifiée des flux de matériaux et d'information entre ces différents acteurs à travers le cycle de vie de l'ouvrage.

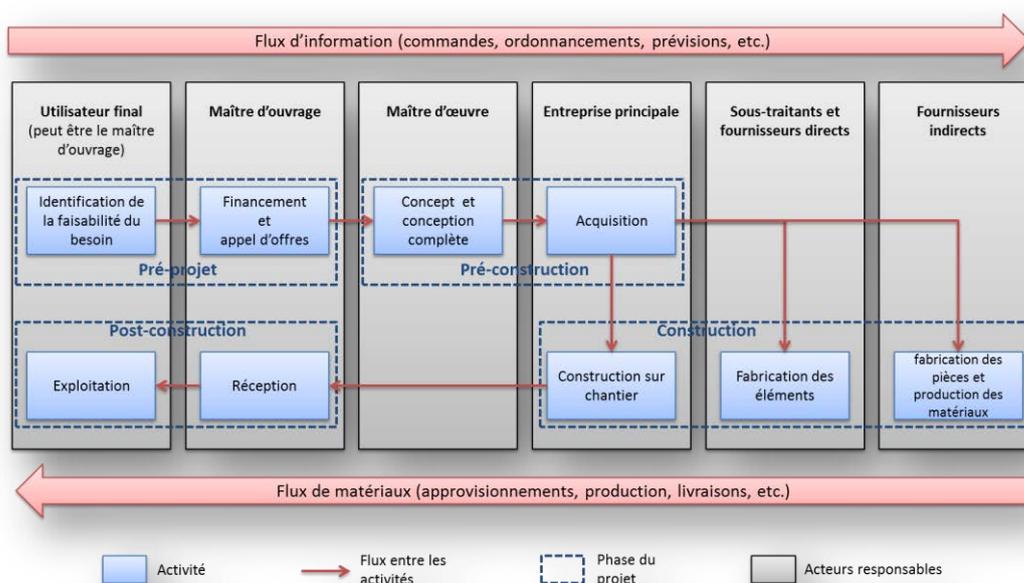


Figure 3 : Configuration typique d'une chaîne de production dans le secteur de la construction [adapté de (Sunke 2009)]

Si une telle représentation a le mérite de donner une idée générale des principales activités réalisées au cours des différentes phases d'un projet de construction ainsi que des types d'acteurs responsables, les flux entre ces activités, tels que présentés, sont extrêmement simplifiés. Car la chaîne de production réelle est beaucoup plus complexe. Dans l'objectif d'en proposer une bonne compréhension, Xue et *al.* ont tenté de modéliser la structure générale de la chaîne de production d'une construction (Xue et *al.* 2007). Le modèle proposé (Figure 4) montre différents types de flux entre les acteurs, les documents et l'ouvrage réalisé. Ces flux sont relatifs à l'information, aux matières et aux finances. De notre point de vue, nous trouvons deux limites importantes à cette proposition. D'abord, l'ouvrage à réaliser est considéré comme un ensemble unique et fini ; ce qui ne

témoigne pas des étapes et des processus de coopération et de collaboration entre les différents acteurs en vue de sa mise en œuvre. Dans le cadre de cette collaboration/coopération, les acteurs seront amenés à échanger différentes formes d'information et de documents. Si le modèle de Xue et al. (2007) fait ressortir certains de ces documents et informations (exigences, documents de conception, demande d'information), il n'en donne pas une idée exhaustive. Ceci s'explique sans doute par le fait que l'échange d'information et de documents est assez problématique dans le secteur et que chaque projet met en place un contexte de collaboration et de coopération différent, ce que ne traduit pas le modèle proposé.

En réalité, modéliser le contexte de coopération d'un projet de construction est une tâche ardue. Nous verrons plus loin, en nous basant sur Kubicki (2006) qu'un tel modèle doit prendre en compte non seulement la dimension collective de l'activité, mais également les dimensions technologique, technique, ergonomique et cognitive liées aux outils utilisés et aux acteurs impliqués.

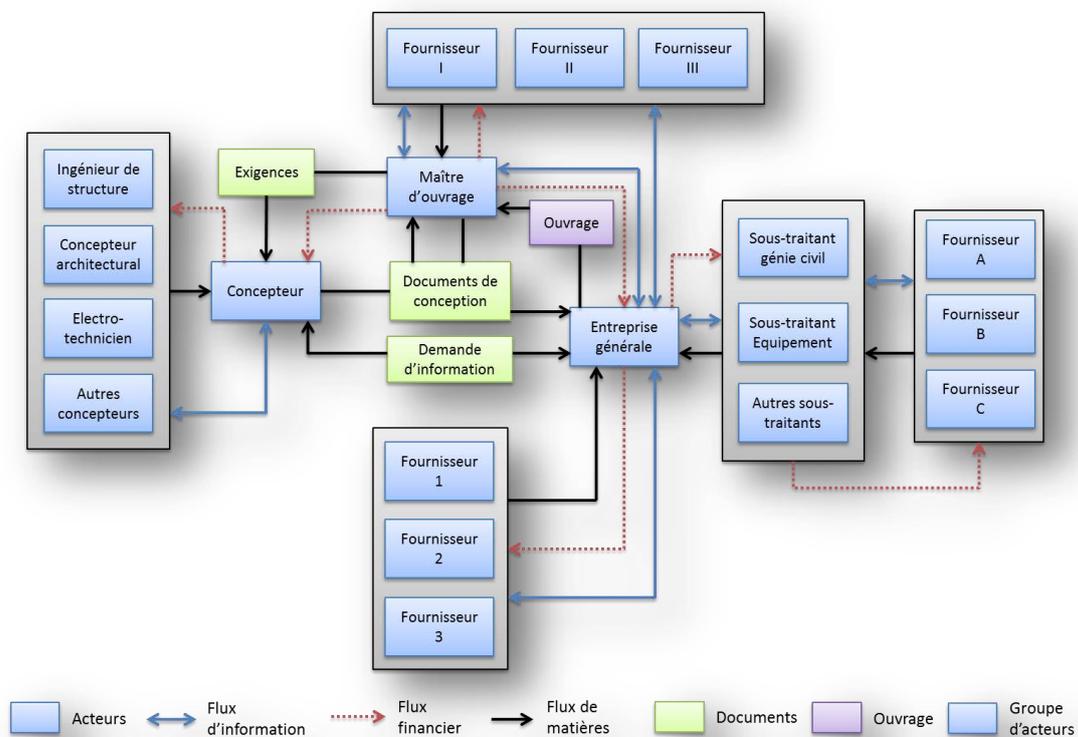


Figure 4 : Structure générale de la chaîne de production d'une construction [adaptée de (Xue et al. 2007)]

Chaque projet de construction met en œuvre un contexte de coopération particulier entre différents acteurs, structures et techniques, pour répondre à un besoin spécifique qui est la construction d'un ouvrage. Comme nous l'avons dit plus haut, le secteur de la construction fonctionne depuis très longtemps sur la base de projets. Patrick propose deux grandes catégories de projets de construction à savoir les projets de constructions lourdes (horizontales) et les projets de constructions de bâtiments (Patrick 2003). Selon cet auteur, les constructions lourdes sont celles liées à la réalisation de systèmes d'infrastructures. Comme projets de construction lourde, l'on retrouve les projets de construction de routes, de ponts, les projets de construction de tunnel ou de barrage, les projets de construction d'aéroport, etc. Quant aux projets de construction de bâtiment, ils concernent les

bâtiments, de types résidentiels ou non. Les bâtiments résidentiels sont ceux de logement privés généralement financés par des propriétaires individuels, contrairement aux autres types de bâtiments, avec une finalité souvent commerciale comme les bureaux, les grands complexes d'habitation, les centres commerciaux. Il est courant, dans le secteur de la construction, de rencontrer des projets difficiles à classer dans l'une ou l'autre de ces catégories. C'est le cas par exemple des installations industrielles, des aciéries ou de certaines usines de fabrication dont la construction demande un grand travail de terrassement relevant de la construction lourde et la mise en place de bâtiments.

La catégorisation de Patrick (2003) n'est pas très éloignée de la segmentation proposée plus récemment par Sunke (Sunke 2009). Il différencie les constructions de bâtiments des constructions d'ingénierie. Les bâtiments sont notamment les bâtiments résidentiels (habitations unifamiliales, appartements, immeubles résidentiels), commerciaux (magasins de détails, bureaux ou centres commerciaux), institutionnels (hôpitaux, écoles ou bâtiments publics) et industriels (centrales électriques, raffineries). Quant aux constructions d'ingénierie, il s'agit des routes (excavations, terrassements ou installation de ponts) et des constructions lourdes (aéroports, systèmes de métro, tunnels ou canalisation). La Figure 5 résume cette catégorisation.

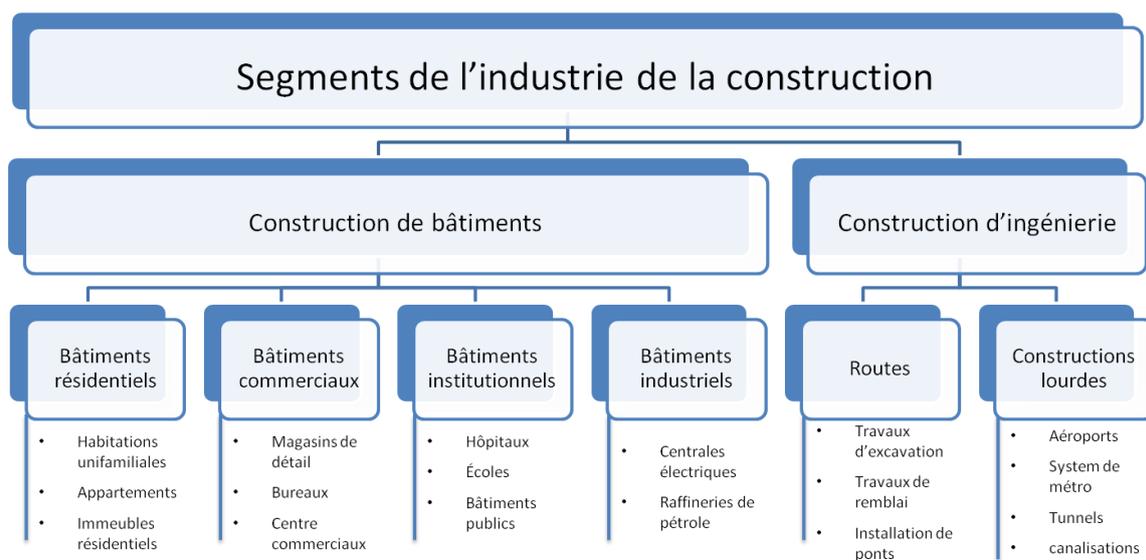


Figure 5 : Segments du secteur de la construction [adaptée de (Sunke 2009)]

1.1.2.2 Les projets de construction

Qu'ils relèvent de la construction d'ingénierie ou de bâtiment, les projets de construction partagent un certain nombre de caractéristiques qui en font des projets particuliers, par rapport aux projets classiques rencontrés dans certains domaines industriels comme l'aéronautique ou l'automobile. Avant d'aborder ces caractéristiques, il importe de rappeler que le secteur de la construction partage un certain nombre de propriétés avec les autres secteurs industriels. Au nombre de ces propriétés, Patrick (2003) met en avant le fait qu'il s'agit dans les deux cas de fabriquer un produit en utilisant des ressources appropriées (matériaux, matériels, main d'œuvre). Le produit est fabriqué en utilisant un processus spécifique et la mise en œuvre se déroule sur un site particulier. Le rapport qualité/coût est très important et il existe un besoin d'optimisation du temps de mise en œuvre. Cela

étant dit, les projets de construction se distinguent, selon Austin, par trois points principaux (Austin et al. 2001) :

- Ils sont toujours des travaux uniques et ponctuels avec des objectifs distincts ;
- Les ressources sont utilisées sur chaque projet de construction dans une configuration unique. Chaque projet est donc non seulement distinct des autres opérations en cours, mais aussi différent d'autres projets ;
- L'environnement dans lequel se déroule un projet de construction est toujours différent et en constant changement. Par exemple, certaines circonstances du projet (les juridictions légales, les conditions du marché, les mécanismes de gestion, etc.) peuvent changer assez souvent.

Baccarini ajoute à ces points l'existence et l'engagement de plusieurs organisations diverses et séparées, nécessitant la mise en place de structures organisationnelles temporaires et des formes contractuelles variant d'un projet à l'autre (Baccarini 1996). Sunke (2009) quant à lui met l'accent sur huit propriétés à prendre en compte :

- des sites de production changeants ;
- des contraintes spatiales ;
- une dépendance aux saisons et aux conditions météorologiques ;
- une législation spécifique à la construction et propre au pays, en particulier la législation environnementale ;
- un compromis temps/ressources ;
- la simultanéité de plusieurs projets ;
- un environnement de planification très incertain ; et
- une combinaison de multiples objectifs (temps, coût, qualité, mise à niveau des ressources).

Si ces huit propriétés ne sont évidemment pas toutes spécifiques au secteur de la construction, certains prennent une importance particulière selon le contexte du projet. Par exemple, la législation en matière de construction au Luxembourg est différente de celle en France, avec un grand impact sur les missions et responsabilités liées aux différents rôles des acteurs et, par ricochet, sur l'organisation même des projets de construction d'un pays à l'autre. Le cas de la mission du coordinateur-pilote comparée par Guerriero, pour les contextes français, luxembourgeois et britannique, en est une bonne illustration (Guerriero 2009).

1.1.2.3 Collaboration problématique et complexité dans un projet de construction

Au regard du fonctionnement du secteur de la construction établi plus haut, il est essentiel de mettre l'accent sur deux notions importantes : 1) la collaboration entre les acteurs et 2) la complexité du projet de construction.

Vu le nombre d'acteurs et leurs rôles dans un projet de construction, la collaboration est essentielle entre les acteurs pour une bonne coordination de leurs activités. Mais la collaboration reste assez problématique pour plusieurs raisons. En plus de la structure même de la chaîne de production des projets de construction (voir Figure 4), Kubicki (2006) note :

- le caractère éphémère des réseaux d'acteurs impliqués dans les opérations de construction ;
- l'hétérogénéité des structures professionnelles fragmentées et juridiquement indépendantes avec des logiques et des intérêts très différenciés ;
- le grand nombre des intervenants et leur forte interdépendance spatio-temporelle ;
- l'existence d'une forte incertitude liée à l'activité de production elle-même, s'expliquant par le fait qu'un bâtiment est toujours un prototype non reproductible, que la demande est variable, et qu'un chantier de construction est sujet à des aléas climatiques ;
- l'abondance de la documentation à propos du projet et la difficulté à la gérer du fait de la variété dans la nature des documents, de la multiplicité des textes réglementaires, et de l'existence de plusieurs formats d'échange.

Les difficultés de collaboration donnent souvent lieu à divers problèmes entre les acteurs dans le cadre d'un projet de construction. Sans être complète, la matrice des problèmes proposée par Xue et al. (2007) présente certaines des difficultés souvent rencontrées (Figure 6).

Participants	Maître d'ouvrage	Maître d'œuvre	Entreprise générale	Sous-traitant	Fournisseur
Maître d'ouvrage	Problèmes internes	- Difficultés à atteindre les volontés du maître d'ouvrage - Changements dans la volonté du maître d'ouvrage - Procédures longues pour discuter des changements	- Problèmes de qualité non résolus - Occupation différée en raison de retard d'achèvement	Pas de relation directe	Pas de relation directe
Maître d'œuvre		Problèmes internes	- Documents incorrects - Changements dans la conception - Délai d'attente étendu pour approbation par l'architecte des modifications dans la conception	Pas de relation directe	Pas de relation directe
Entreprise générale			Problèmes internes	Travail en sous-traitance n'est pas livré selon la conception, le contrat principal et le planning	- Données inexactes - Besoins d'information non remplis - Négociation contradictoire - Changements dans les commandes
Sous-traitant				Problèmes internes	- Livraisons non conformes au planning - Livraisons erronées ou défectueuses - Longue période de stockage - Mauvais emballage - Gros envois
Fournisseur					Problèmes internes

Figure 6 : La matrice des problèmes de Xue et al. (Xue et al. 2007)

En ce qui concerne la complexité, Gidado la définit comme étant la mesure de la difficulté à implémenter un flux de production planifié par rapport à des objectifs managériaux (Gidado 1996). Il s'agit d'une notion d'autant plus importante dans la caractérisation des projets de construction que ces projets sont généralement considérés comme étant naturellement complexes. Dans la réalité,

tous les projets de construction n'ont pas le même niveau de complexité, car si certains projets peuvent être véritablement très complexes, d'autres le sont beaucoup moins. Des interviews avec des professionnels du secteur de la construction ont permis à Gidado (1996) de recenser ce qu'ils entendent par projets complexes. De leur point de vue, les projets complexes sont les projets :

- ayant un très grand nombre de systèmes techniques différents à mettre en œuvre ensemble et/ou avec un grand nombre d'interfaces entre les éléments ;
- impliquant des travaux sur un site confiné et difficile d'accès et obligeant plusieurs corps de métiers à travailler en même temps au même endroit ;
- avec beaucoup d'enchevêtrements pour lesquels il est difficile de préciser clairement comment atteindre un objectif désiré ni combien de temps il faudrait ;
- exigeant beaucoup de détails d'exécution ;
- demandant une coordination, un contrôle et un suivi rigoureux durant toute leur exécution ;
- exigeant un lien logique, car un projet complexe se heurte généralement à une série de révisions en cours de construction et sans interrelation entre les activités, il devient très difficile de mettre à jour le programme de la manière la plus efficace.

Cette liste donne une idée de la complexité en matière de projet de construction, mais la mesure de la complexité n'apparaît pas aisée, car les critères énumérés sont pour la plupart assez subjectifs et de niveaux différents. Gidado propose de les classer en deux catégories :

- la première traite des composantes inhérentes à l'exécution des tâches individuelles et donc qui proviennent des ressources employées ou de l'environnement. Dans cette catégorie, on retrouve les difficultés liées aux rôles joués par les individus dans le système. Cette difficulté peut provenir des technologies utilisées, des compétences des individus responsables de l'activité de construction, ou de sources environnementales. On retrouve également dans cette catégorie les facteurs d'incertitudes liés aux tâches, à l'environnement et aux ressources utilisées.
- la deuxième catégorie traite des complications résidant dans le séquençage des opérations liées au fait de mettre ensemble plusieurs parties dans le but de réaliser un processus. Cette catégorie est divisée en trois sous-catégories : **a)** la variation et l'interrelation entre les technologies utilisées par les différentes parties impliquées dans la réalisation d'une activité, **b)** le niveau de flexibilité dans les flux d'activité et **c)** le chevauchement entre différents éléments de l'ouvrage à construire.

Les projets de construction présentent des caractéristiques qui les rendent plus ou moins complexes. Il est évident que plus le projet est complexe, plus difficile sera sa gestion. Et pour comprendre les éléments expliquant le succès d'un projet de construction, il est nécessaire d'étudier les indicateurs de succès couramment utilisés, ainsi que les facteurs de la gestion du projet qui en assurent le succès.

1.1.3 Les facteurs de succès d'un projet de construction

Avant d'aborder les facteurs de succès d'un projet de construction, il paraît essentiel de comprendre d'abord ce qui permet de conclure au succès ou non d'un projet de construction. Autrement dit, il

s'agit d'en déterminer les critères ou les indicateurs de succès. Un critère de succès peut être compris comme étant un ensemble de principes ou de normes par lesquels les résultats atteints peuvent être mesurés dans le cadre d'un ensemble de spécifications (Chan & Chan 2004).

1.1.3.1 Les indicateurs de succès

D'un point de vue général, plusieurs critères ont été proposés pour mesurer le succès d'un projet. Shenhar et al. (1997) les ont regroupés en 4 catégories :

- l'efficacité du projet (résultat à court terme, respect du délai, respect du budget) ;
- l'impact sur le client (exigences fonctionnelles, spécifications techniques) ;
- le succès au niveau de l'entreprise (l'amélioration apportée) ; et
- la préparation de l'avenir (résultat à long terme, préparation de l'organisation et de son infrastructure technologique pour l'avenir).

Atkinson (Atkinson 1999) propose de distinguer les critères liés à la période de réalisation du projet, des critères liés à la période post-construction. Selon lui, il s'agit à l'étape de réalisation de « faire les choses comme il faut » dans le respect des règles de l'art. À cet effet, les critères utilisés peuvent être le coût, le délai, la qualité, l'efficacité. À l'étape post-construction, il s'agit « d'obtenir les bonnes choses », ce qui donne lieu à des critères liés au bénéfice tiré par les différentes parties prenantes et au système résultant du projet. À cette étape, il est également question de mesurer l'impact sur le client et le succès apporté à l'entreprise. En restant dans la même logique, Lim et Mohamed (Lim & Mohamed 1999) tentent de simplifier en proposant de voir les critères d'un point de vue « macro » et d'un point de vue « micro ». Du point de vue « micro », ils suggèrent de mesurer le respect du délai, du budget, de la qualité, de la performance, et de la sécurité. Du point de vue « macro », l'on s'intéressera à la satisfaction, à l'utilité du produit et à l'impact.

En application de ces principes, certains critères sont souvent utilisés pour évaluer le succès des projets de construction. Ces critères sont liés notamment à la qualité (spécifications techniques), au respect de l'enveloppe financière, des délais, de la sécurité et la santé sur le chantier et à la satisfaction des participants et surtout du client. Avec les enjeux du développement durable, d'autres critères apparaissent comme les critères environnementaux. La notion d'indicateurs clés de performance (KPI) a également été développée et utilisée (par exemple par le groupe de travail constitué à cet effet par le ministère chargé de la construction en Grande Bretagne (The KPI Working Group 2000)). Il s'agit d'indicateurs de performance se concentrant sur des aspects cruciaux du rendement ou du résultat d'un projet de construction. Chan et Chan (Chan & Chan 2004) distinguent les indicateurs dont la mesure peut être objective (durée, vitesse de construction, variation de délai, coût unitaire, variation du coût final, valeur actuelle nette, taux d'accident, score d'étude d'impact environnemental) de ceux dont la mesure est plutôt subjective (qualité, fonctionnalité, satisfaction de l'utilisateur final, satisfaction du client, satisfaction de l'équipe de conception) (voir Figure 7).

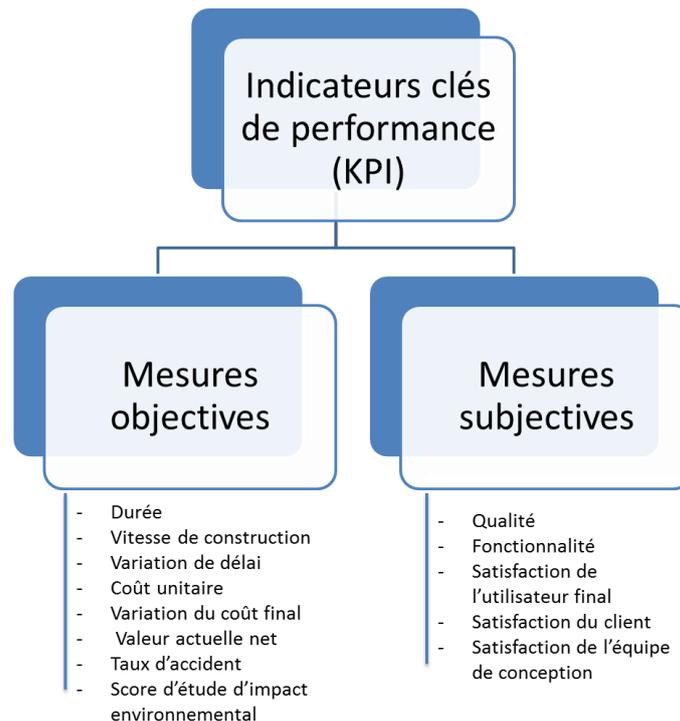


Figure 7 : Indicateurs clés de performance pour le succès d'un projet de construction [adapté de (Chan & Chan 2004)]

Si le succès d'un projet de construction est mesurable, il est donc possible d'identifier les facteurs qui en amont dans la mise en œuvre et la gestion du projet devraient influencer positivement les indicateurs de succès. Autrement dit, quels sont les facteurs contribuant au succès d'un projet de construction ?

1.1.3.2 Les facteurs de succès des projets de construction

La notion de facteur de succès est à différencier de celle d'indicateur de succès. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, les indicateurs de succès sont des critères pour mesurer le succès d'un projet alors qu'un facteur de succès se rapporte aux éléments (de la gestion de projet) qui ont un impact sur la réussite ou non du projet. Chan et *al.* identifient cinq familles principales de facteurs de succès (Chan et *al.* 2004) :

- les facteurs liés au projet lui-même : il s'agit du type, de la nature, du nombre de niveaux, de la complexité et de la taille du projet ;
- les facteurs liés à l'environnement externe du projet : il s'agit de l'environnement économique, social, politique, physique du projet, mais aussi l'environnement des relations industrielles et l'avancée technologique ;
- les facteurs liés aux actions entrant dans le cadre de sa gestion : il s'agit de toutes les actions relatives au système de communication, au mécanisme de contrôle, aux possibilités de retour d'information, aux efforts de planification, etc. ;
- les facteurs liés aux participants : il s'agit des facteurs liés au client, aux compétences et au leadership dans l'organisation ; et
- les facteurs liés aux procédures : Il s'agit essentiellement des méthodes d'approvisionnement et d'adjudication.

Ces auteurs proposent un cadre conceptuel résumant les différentes familles de facteurs et les relations entre elles (Figure 8).

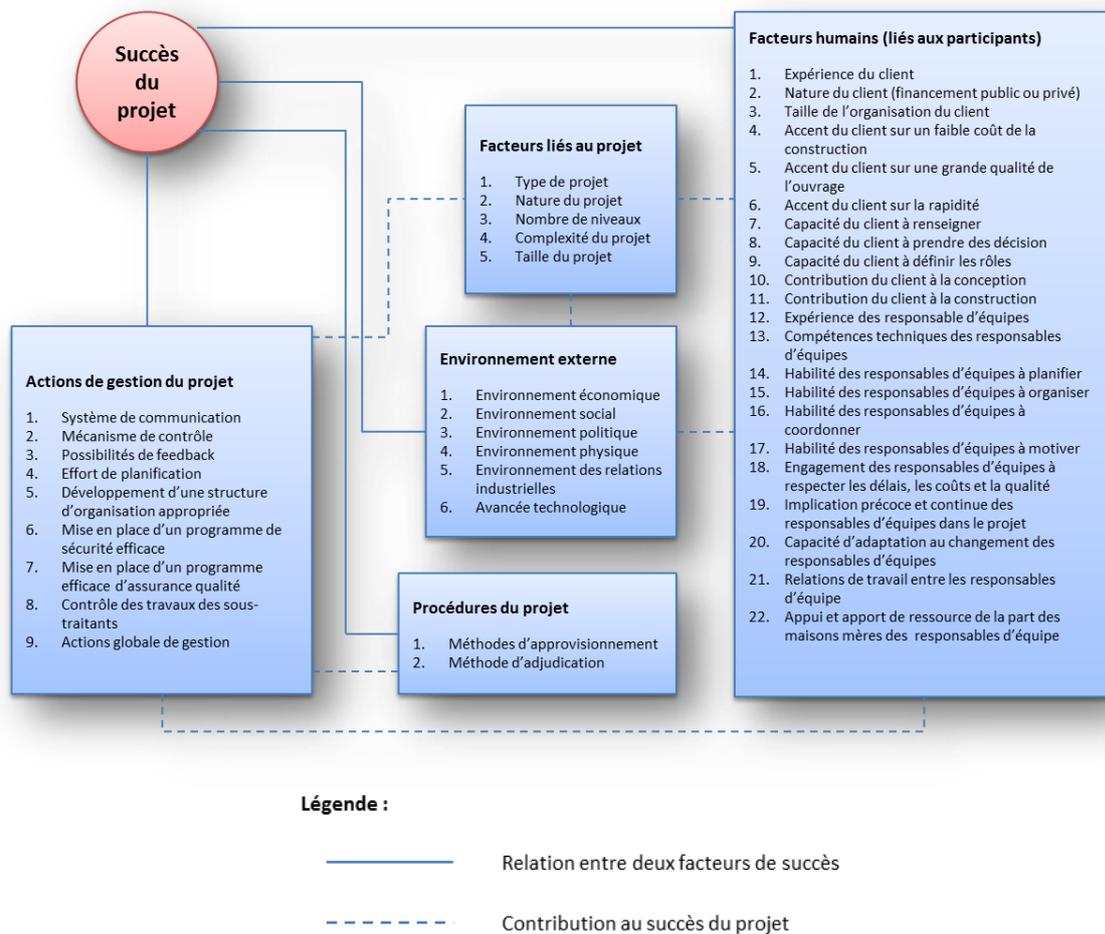


Figure 8 : Cadre conceptuel pour les facteurs affectant le succès d'un projet de construction [adapté de (Chan et al. 2004)]

Si un tel cadre conceptuel a l'avantage d'être assez complet, il n'est pas très pratique pour comprendre, de manière très pragmatique, les facteurs affectant le succès d'un projet de construction et donc influençant les indicateurs de performance tels que définis dans le point précédent. Du point de vue de la gestion du projet, Chua et Kog pensent que les différents facteurs contribuent différemment à différents objectifs du projet (Chua & Kog 1999). Ils identifient 3 objectifs principaux qui sont le budget, le calendrier et la qualité. Quatre catégories de facteurs vont influencer l'atteinte de ces objectifs : les caractéristiques du projet, les arrangements contractuels des participants et les processus interactifs (Figure 9). Une telle hiérarchisation présente l'intérêt de lier les facteurs de succès à des fonctions managériales du projet. Il est ainsi possible d'influencer certains objectifs en intervenant sur l'un ou l'autre des facteurs de succès identifiés. Les fonctions managériales correspondent aux fonctions de gestion d'une organisation. On en distingue généralement cinq à savoir la planification, l'organisation, la gestion du personnel, le leadership et le contrôle (Koontz 1980).

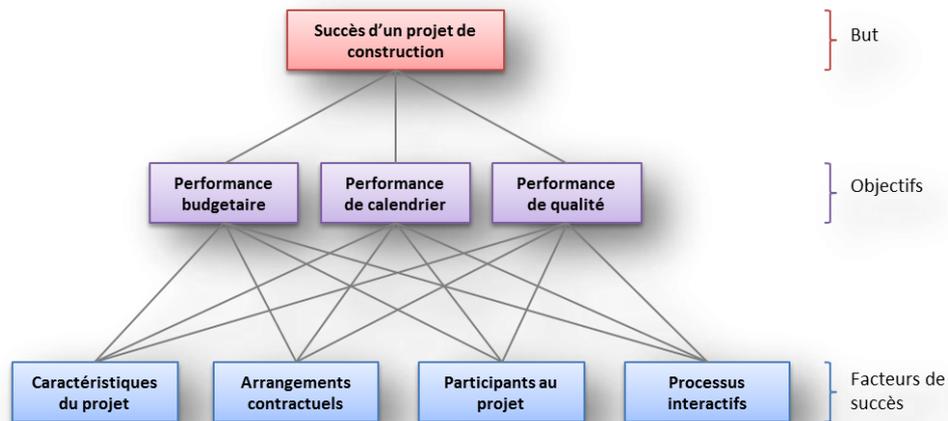


Figure 9 : Modèle hiérarchique pour le succès des projets de construction [adapté de (Chua & Kog 1999)]

Les trois principaux objectifs d'un projet de construction sont effectivement le budget, le calendrier et la qualité. De ces trois objectifs, il faut noter que les objectifs de calendrier et de budget, considérés comme étant tangibles, démontrables et économiquement mesurables, reçoivent en général plus d'intérêt que les objectifs de qualité, perçus comme étant plus vagues et faiblement définis (Laufer & Tucker 1987). De plus, le coût du projet contribue beaucoup plus au succès commercial de l'entreprise responsable et le calendrier constitue une exigence importante pour la gestion du projet ; ce qui se traduit par la grande attention apportée à la planification et à l'ordonnancement des travaux dans les projets de construction. Parmi les fonctions managériales dans les projets de construction, la planification est considérée comme étant la plus importante en ce sens qu'elle a la capacité d'augmenter ou de réduire considérablement les chances de réussite (Gidado 1996; Laufer & Tucker 1987). En effet, la planification permet de compenser l'incertitude et le changement, de concentrer l'attention sur les objectifs, d'obtenir une exploitation économique, et de faciliter le contrôle (Koontz et al. 1980). Elle est d'ailleurs considérée par beaucoup comme étant la compétence centrale de la gestion de projet (Winch 2010). Chevallier et Russel le disent clairement :

« une planification efficace est l'un des aspects les plus importants d'un projet de construction dans la mesure où elle influence directement le succès du projet » (Chevallier & Russel 1998) cité par (Heesom & Mahdjoubi 2004), page 171.

Selon Waly et Thabet, si la planification est un processus critique pour le succès d'un projet de construction, elle est aussi l'une des activités les plus difficiles auxquelles les équipes de projet (aussi bien les concepteurs que les constructeurs) doivent faire face (Waly & Thabet 2002).

◆ **Retenons, avant d’aller plus loin :**

- 1) Le secteur de la construction est important pour l’économie d’un pays.
- 2) Chaque projet de construction met en place un contexte particulier avec plusieurs acteurs jouant des rôles différents qui changent d’un projet à l’autre.
- 3) Certains facteurs liés à la gestion peuvent influencer le succès d’un projet de construction.
- 4) La planification est considérée comme étant la fonction managériale la plus importante dans un projet de construction.

1.2 La planification de la construction et la simulation 4D/nD de la construction

Nous avons compris plus haut que la planification est importante dans le succès d’un projet de construction. Dans cette partie, nous allons définir la planification de la construction, explorer les concepts importants qui lui sont liés, et présenter les méthodes de planification existant dans le secteur. Nous insisterons par ailleurs sur la notion de « multiplicité » qui caractérise la planification de la construction.

1.2.1 Qu’est-ce que la planification de la construction ?

La planification est l’établissement des activités et événements du projet, leurs relations et interrelations, et les séquences dans lesquelles les activités doivent être réalisées ainsi que les ressources nécessaires à la réalisation (Popescu & Charoenngam 1995). De manière plus large, il s’agit d’un « processus de décision effectué à l’avance de l’action et qui s’efforce de concevoir un futur désiré et les moyens efficaces pour y parvenir » ((Ackoff 1970) cité par (Laufer & Tucker 1987)). Hendrickson et Au définissent la planification de la construction comme étant le processus d’identification des activités et des ressources nécessaires pour faire de l’ouvrage conçu une réalité physique (Hendrickson & Au 1989). Il s’agit selon Laufer et Tucker (1987) de répondre aux questions ci-après :

- *Que* fait-on ? (activités)
- *Comment* réalise-t-on les activités ? (méthodes)
- *Qui* doit réaliser chaque activité et avec quels moyens ? (ressources)
- *Quand* doit-on réaliser les activités ? (séquence et temps)

Le processus de la planification est généralement découpé en cinq phases : la planification du processus de planification, la collecte d’information, la préparation des plannings, la diffusion de l’information, et l’évaluation du processus de planning (Laufer & Tucker 1987).

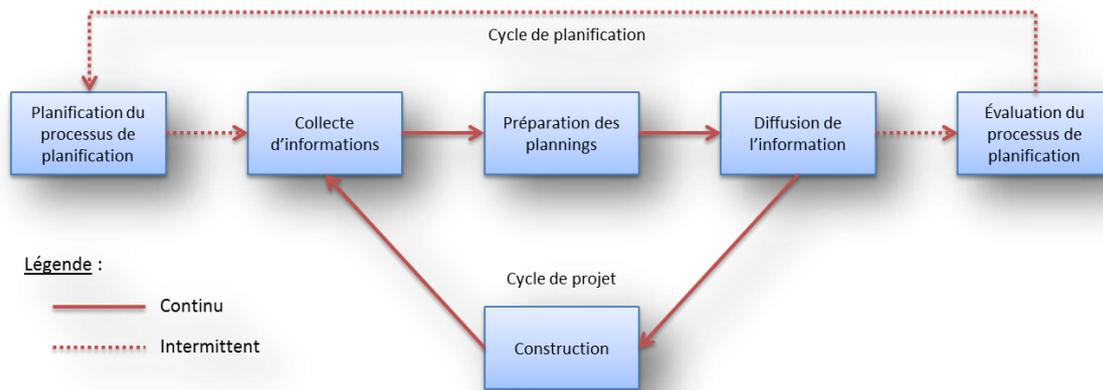


Figure 10 : Le processus de planification [adapté de (Laufer & Tucker 1987)]

Pour bien comprendre la planification de la construction, nous évoquerons deux grands dilemmes à savoir *qui planifie* et *quand on planifie* (Laufer et al. 1992). Et pour permettre une bonne assimilation de ces dilemmes, nous tenterons d'abord de trouver une réponse à d'autres questions récurrentes : *pourquoi planifier* et *que planifie-t-on* ?

1.2.1.1 Pourquoi planifier ?

Laufer et Tucker (1987) ont identifié cinq buts principaux à la planification : l'**exécution**, la **coordination** et la **communication**, le **contrôle**, la **prévision**, et l'**optimisation**.

- Par **exécution**, ils entendent la direction des parties de travaux sous la responsabilité de l'entreprise de construction. Ils considèrent l'exécution comme étant la raison d'être de toute planification, car selon eux, il n'y a pas de projet de construction sans exécution. Il est donc important de bien comprendre l'exécution de manière à pouvoir prendre assez tôt des décisions appropriées pour la gestion du chantier.
- La planification permet également de **coordonner** les activités et de **communiquer** entre les différents acteurs du projet. Cela permet d'harmoniser et de faciliter la gestion de l'interdépendance entre les activités et/ou les groupes d'activités.
- La planification permet également le bon **contrôle** des activités, de manière à s'assurer que les activités se déroulent comme il faut et que les objectifs espérés sont atteints. Un tel contrôle est nécessaire pour éviter différentes sortes de risque, y compris les risques conceptuel, administratif et environnemental.
- En ce qui concerne la **prévision**, elle consiste à prévoir les performances du projet et d'identifier les jalons futurs. Il s'agit notamment de traiter les informations collectées au cours des projets passés et de les utiliser pour mieux anticiper le futur. À cet effet, l'apport des outils statistiques et informatiques peut s'avérer fort utile.
- L'**optimisation** concerne le besoin d'étudier et d'analyser des composantes ou des aspects du projet. C'est le cas par exemple de l'analyse de constructibilité qui est définie comme étant « l'intégration optimale de la connaissance et de l'expérience de construction des différents acteurs du projet, avec la conception technique de manière à atteindre les objectifs globaux du projet » (Laufer & Tucker 1987).

Dans la pratique, la planification de la construction dépend fortement des utilisateurs finaux du planning et de l'évolution de la vie du projet. À cet effet, Laufer et *al.* (1994) identifient treize buts pour la planification de la construction, en fonction des utilisateurs :

- la définition des objectifs. Selon Laufer et *al.* (1994), cela inclut aussi bien l'identification des contraintes que la prise en compte des priorités et autres compromis ;
- la mise en place d'une base pour faciliter les engagements contractuels entre les différents acteurs impliqués dans le projet ;
- une maximisation de la probabilité d'atteindre les objectifs, ce qui passe par leur clarification et une bonne appropriation par tous ;
- la décomposition des travaux et leur répartition en lots d'ouvrages, de manière à permettre à chacun d'identifier clairement ses responsabilités et de bien se positionner ;
- la mise en place de grandes lignes pour les planifications futures, de manière à élaborer une perspective globale et maintenir ainsi une continuité ;
- la réalisation d'un plan de mise en œuvre avec affectation des ressources sur le chantier ;
- l'améliorer de la collaboration, notamment par une meilleure coordination et une meilleure communication ;
- la mise en place de critères pertinents pour le suivi et le contrôle des travaux ;
- la prévision des taux de réalisation, de manière à pouvoir contrôler le rendement du projet pendant sa réalisation ;
- l'optimiser de l'exécution du projet. Cela peut se faire en analysant et en comparant plusieurs alternatives ;
- la diminution des mauvaises décisions, par l'évaluation de l'implication des décisions prises sur les actions menées ;
- l'amélioration de la capacité des acteurs à réagir aux risques et aux changements qui pourraient survenir pendant la réalisation du projet ;
- l'amélioration continue, notamment par une capitalisation de l'expérience accumulée avec les projets précédents.

1.2.1.2 Que planifie-t-on ?

La question ici est de savoir ce que représente le planning. Une étude comparative des pratiques de planification dans les entreprises de construction américaines et israéliennes a été menée sur une période de 10 ans par Laufer et *al.* [(Laufer et *al.* 1992), repris dans (Laufer et *al.* 1994)]. Il ressort de cette étude sur trois principales étapes de la construction (étude préliminaire, pré-construction et construction) que la planification de la construction étudiée, non seulement l'ordonnancement, les coûts et les flux de trésoreries, mais également les méthodes de travail, l'organisation, les équipements majeurs, l'allocation des ressources et l'aménagement (voir Tableau 1). Plus généralement, le Project Management Institute (PMI 2000b; PMI 2000a) identifie pas moins de neuf processus de planification différents, qu'il classe en 2 groupes : les processus de base et les processus de facilitation. Parmi les processus de base, nous citerons :

- la planification de la portée (définition et planification de l'étendue du projet) ;
- la planification temporelle (définition des activités, de leur séquençage ; estimation de leur durée ; et élaboration de l'ordonnancement) ;

- la planification des coûts (planification des ressources, estimation des coûts, budgétisation) ;
- la planification de risques (planification de la gestion des risques) ;
- la planification de l'intégration (élaboration du plan de projet).

En ce qui concerne les processus de facilitation, ils concernent :

- la planification de la qualité ;
- les ressources humaines (planning organisationnel, recrutement du personnel) ;
- l'approvisionnement (planification de l'approvisionnement, planification des sollicitations) ;
- la communication (planification de la communication) ;
- les risques (identification des risques, analyse des risques, planification de réponse aux risques).

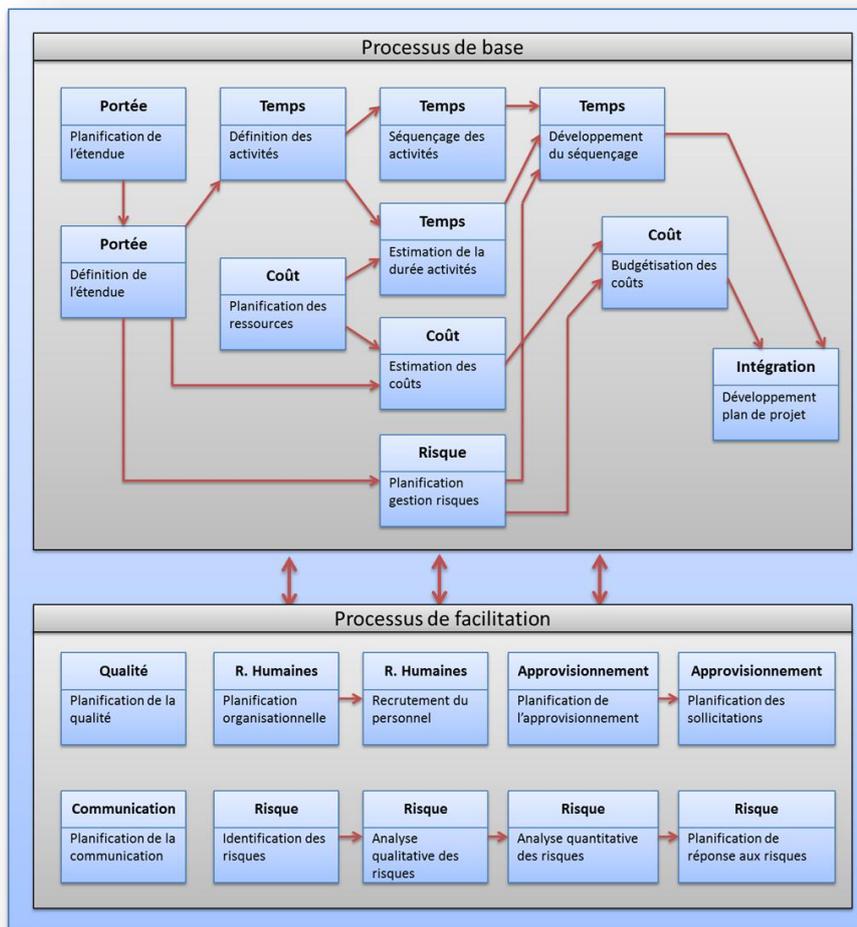


Figure 11 : Différents processus de planification [adapté de (PMI 2000a)]

L'autre enseignement de l'étude menée par Laufer et *al.* (1992) est que, quel que soit le contenu du planning, différents formats de représentation des données sont utilisés. Nous insistons sur ce point particulier parce qu'il sera plus tard crucial dans notre argumentation et la formulation de nos hypothèses, étant entendu que notre problématique concerne la visualisation et la représentation

adaptée de l'information. Il est donc important de noter à cette étape que le planning de la construction, en fonction des besoins de l'utilisateur, peut prendre plusieurs formes visuelles différentes (que nous désignons par représentations visuelles). Les représentations usuelles mises en évidence par le travail de Laufer et *al.* (1992) sont de 5 ordres :

- textes : listes et check-lists, protocoles de réunion, instructions verbales ;
- diagrammes organisationnels, y compris les plans ;
- diagrammes techniques : WBS, structures organisationnelles ;
- chronogrammes : Gantt, CPM, diagrammes temps/ressource ;
- tableaux, incluant d'autres formes de formulaires standards.

Tableau 1 : Représentations utilisées pour le planning en phase pré-construction [adapté de (Laufer et *al.* 1994)]

Planning	Textuel	Proportion d'utilisation par type de représentation (%)				Total
		Diagrammes techniques	Diagrammes organisationnels	Diagramme de temps (chronogramme)	Tableau	
Ingénierie et méthode	55	9	–	36	–	100
Organisation et contrat	59	–	35	–	6	100
Ordonnancement	8	12,5	12,5	67	–	100
Coût et flux de trésorerie	20	–	–	30	50	100
Équipement majeur	47	20	–	13	20	100
Aménagement et logistique	30	60	–	5	5	100
Méthodes de travail	50	27	4	15	4	100
Allocation de main d'œuvre	24	5	9,5	52	9,5	100
Allocation de matériaux	45	5	–	25	25	100
Moyenne pondérée	36	16	7	28	13	100

Nous verrons plus loin que plusieurs méthodes de planification existent et donnent lieu à différents types de diagrammes et de chronogrammes (voir le paragraphe 1.2.2.3). À cette étape, il convient de retenir que plusieurs représentations existent pour le planning.

1.2.1.3 Qui planifie ?

Cette question correspond au dilemme de la compétence (A Laufer & R. L. Tucker 1988). Laufer et Tucker identifient deux acteurs clés, le **gestionnaire** et le **spécialiste en planification**, dont ils évaluent les forces et faiblesses en matière de planification (A Laufer & R. L. Tucker 1988). Le gestionnaire est par exemple le gestionnaire du projet ou le coordinateur de chantier, tandis que le spécialiste peut être un ingénieur de projets ou un ingénieur d'ordonnancement. Partant du principe que quatre compétences de planification sont nécessaires (disponibilité, collecte d'informations, prise de décision et implémentation), ils concluent que l'un comme l'autre possède seulement une

partie de la compétence nécessaire ; et qu'aucun des deux ne saurait réaliser le planning sans l'autre (voir Figure 12). Ils suggèrent donc (Laufer & Tucker 1988) :

- la coordination de la planification soit principalement de la responsabilité du spécialiste en planification de l'équipe. Ainsi, le gestionnaire interviendrait pour fournir un appui politique et un environnement favorable et à des moments pour prendre des décisions concernant le processus de planification proprement dit ;
- la collecte des informations nécessaires soit presque exclusivement menée par le spécialiste en planification de l'équipe. Le gestionnaire pour sa part devrait partager l'information dont il est la source exclusive ;
- les activités analytiques (comme le diagnostic, l'élaboration et l'évaluation d'alternatives) sont celles pour lesquelles l'interaction doit être à son pic entre le gestionnaire et le spécialiste en planification de l'équipe ;
- les choix appartiennent uniquement au gestionnaire, car il peut les accomplir effectivement seulement s'il a été activement impliqué dans la phase d'analyse.

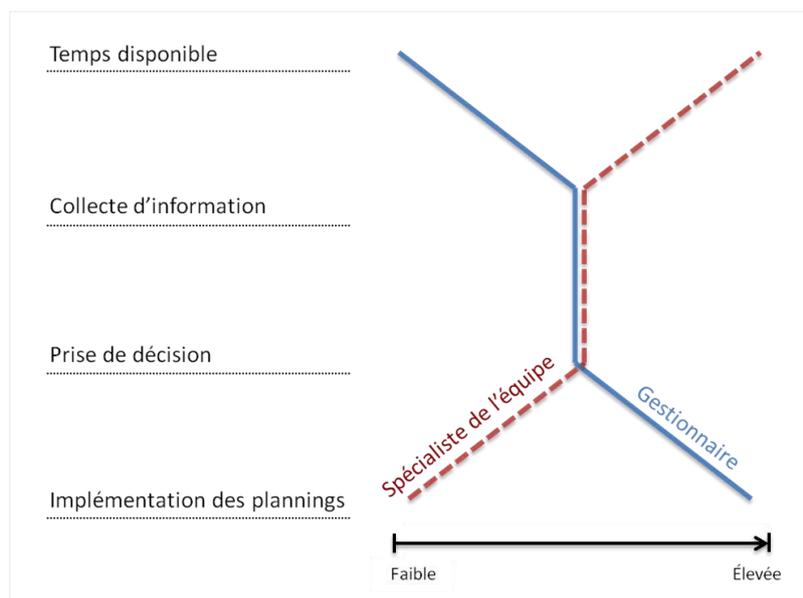


Figure 12 : Compétences de planification du gestionnaire et du spécialiste de planification de l'équipe [adapté de (Laufer & Tucker 1988)]

Quelques années plus tard, les mêmes auteurs ont étudié la pratique réelle dans les grandes entreprises de construction américaines et israéliennes (Laufer et *al.* 1992). Il en ressortait d'autres types d'acteurs :

- le gestionnaire de projet est impliqué dans plus de domaines de planification tout au long de la vie du projet que n'importe qui d'autre ;
- le coordinateur est impliqué dans le processus de planification en phase de pré-construction et continue de montrer une implication étendue, de manière interchangeable avec le gestionnaire de projet, durant la construction ;
- l'ingénieur de projets, presque invisible au cours des deux premières phases (pré-projet et pré-construction), devient fortement visible durant la construction.

- la direction de l'entreprise (au bureau) est fortement impliquée en phase pré-projet et beaucoup moins après, lorsque le chantier prend le relais comme champ majeur de planification.
- les sous-traitants sont fortement impliqués à la planification durant les phases de pré-construction et de construction.

Ces différents éléments font ressortir l'aspect collaboratif de la planification de la construction que nous aborderons plus loin (paragraphe 1.2.2.2).

1.2.1.4 Quel est le meilleur moment pour planifier ?

Il est généralement admis que planifier avant le démarrage de la construction est crucial pour minimiser les coûts, car toute décision relative à la conception et/ou à la gestion des ressources prise au démarrage du projet coûtera beaucoup moins cher que si elle est prise en cours d'exécution, en particulier dans les dernières phases du projet (Patrick 2003). Mais la question du *quand planifier*, correspondant au troisième principe de multiplicité (voir point 1.2.2), est loin d'être aussi simple (Laufer & Tucker 1988). Elle est en réalité celle du *dilemme du timing* (Laufer & Tucker 1988) qui pose le problème en se demandant si l'on devrait :

- planifier bien en avance sur la mise en œuvre afin de pouvoir y exercer une plus grande influence ; ou plutôt
- reporter la planification jusqu'au démarrage des travaux pour assurer une plus grande précision de la planification (voir Figure 13).

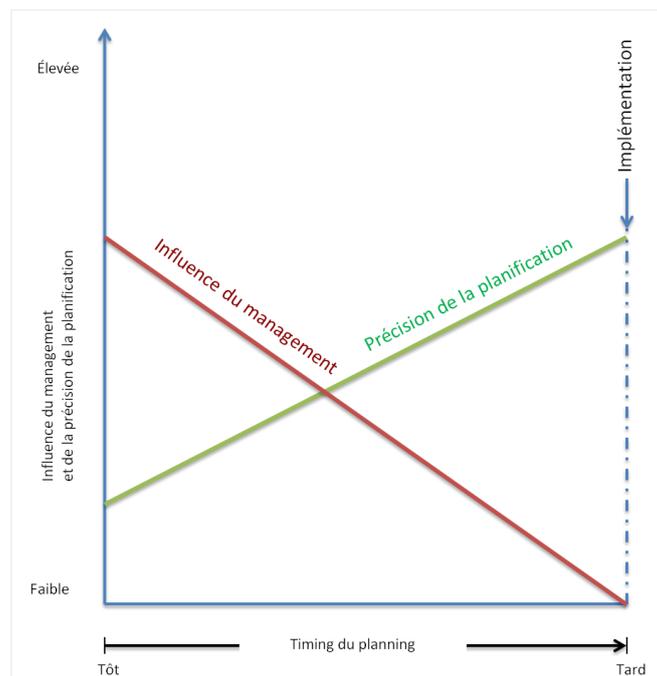


Figure 13 : Effets du *timing* de la planification [adapté de (Laufer & Tucker 1988)]

Selon Laufer et Tucker (1988), la clé réside dans le niveau de détail avec lequel le planning est élaboré, en rapport avec l'horizon de planification (période future couverte par le planning). Aussi ont-ils proposé que :

- le niveau de détail varie inversement avec l'horizon de planification (plus on est proche de l'implémentation, plus précis devraient être les détails) ;
- lorsque l'incertitude est élevée, le niveau de détail soit réduit ;
- au fur et à mesure que l'horizon de planification est éloigné, la liste des activités devienne plus petite et les spécifications pour chaque activité plus compactes. L'attention devrait alors être plus portée sur l'examen d'idées plutôt qu'à l'analyse de faits et de chiffres précis ; et l'accent davantage mis sur l'évaluation de l'avenir plutôt que sur les décisions actuelles ;
- plus l'incertitude est élevée, plus élevée soit la fréquence de révision de la planification ;

1.2.2 La multiplicité dans la planification de la construction

Selon Hendrickson, la réalisation d'un bon planning de la construction est un problème « exceptionnellement difficile » (Hendrickson & Au 1989). Ceci s'explique bien sûr par les caractéristiques des projets de construction évoquées plus haut. Mais plus particulièrement, la notion de multiplicité liée au planning de la construction semble en être la cause principale. Laufer et *al.* (1994) définissent cette multiplicité par le fait qu'une planification effective de la construction :

- traite différents buts et s'adresse à divers utilisateurs
- nécessite différents plannings et divers formats
- nécessite différents *timings* et s'établit sur divers horizons de temps
- fait appel à différents participants et différents modes de préparation

Si les buts de la planification et les différents horizons de temps ont été bien abordés plus haut, les questions liées aux utilisateurs du planning, aux participants à la planification et aux différents formats du planning ne l'ont été que partiellement jusqu'ici. Nous proposons donc d'y revenir afin de mettre un accent particulier sur l'aspect collaboratif de la planification et l'existence de différents formats et modes de représentation du planning. Quant aux méthodes et techniques de planification, elles seront traitées un peu plus tard.

1.2.2.1 Diversité des buts et des utilisateurs du planning

Nous avons abordé plus haut (paragraphe 1.2.1.1) les différents buts de la planification de la construction. Il est utile ici de rappeler que ces buts sont principalement de cinq ordres : l'exécution, la coordination et la communication, le contrôle, la prévision, et l'optimisation. En effet, la planification peut notamment permettre :

- de comprendre l'exécution et prendre assez tôt des décisions ou des directives appropriées pour la gestion opérationnelle du chantier ;
- de coordonner les activités et de communiquer entre les différents acteurs du projet aussi bien au bureau que sur chantier, de manière à harmoniser et faciliter les groupes d'activités ;
- de contrôler de manière adéquate et prévisionnelle l'exécution des activités afin de s'assurer qu'elles se déroulent comme il faut et que les objectifs espérés sont atteints ;
- de mesurer les performances du projet et de poser des jalons futurs ;

- d'analyser la constructibilité des ouvrages et d'étudier des alternatives de choix techniques.

Nous avons également montré que le planning est destiné à plusieurs utilisateurs finaux avec des objectifs différents (paragraphe 1.2.1.1) et que la planification est réalisée par plusieurs acteurs différents (paragraphe 1.2.1.3). L'utilisateur du planning, en fonction de son besoin spécifique, va faire appel à la méthode de planification la plus adaptée et à des modes de représentation adéquats. Nous présenterons plus loin sur les principales méthodes de planification utilisées dans le secteur de la construction (voir 1.2.3).

1.2.2.2 L'aspect collaboratif de la planification

Comme nous l'avons vu plus haut, plusieurs acteurs participent à un projet de construction, chacun avec un point de vue, des intérêts et un rôle différents. Nous avons également vu que même si la collaboration est difficile dans le secteur de la construction, les acteurs n'ont d'autre choix que de collaborer pour résoudre différents problèmes auxquels ils peuvent être confrontés. La planification de la construction n'échappe pas à la règle et nécessite généralement l'implication de plusieurs acteurs. Qu'il s'agisse de l'ordonnancement des activités, des coûts, des flux de trésoreries, des méthodes de travail, de l'allocation des ressources ou même de l'aménagement et de la logistique, la prise en compte des compétences et des points de vue de plusieurs acteurs est généralement nécessaire. Pour bien comprendre cette nécessité de collaboration dans la planification, il faut rappeler la forte interdépendance des différentes activités du projet et des disciplines œuvrant ensemble pour la construction de l'ouvrage. De plus, il faut avoir à l'esprit que dans la pratique la planification se réalise, non pas de manière linéaire, mais plutôt de façon itérative en prenant en compte à chaque itération les interrelations entre les différentes activités et les contraintes liées aux ouvrages et tâches interdisciplinaires.

Pour donner une idée de ces interrelations, Li et *al.* (2006) prennent l'exemple de l'impact important que peut avoir le choix des méthodes de construction sur la planification de l'espace de travail, la disponibilité de cet espace pouvant à son tour affecter le sous-traitant dans le choix de sa méthode de construction. Plus généralement, Winch (2010) identifie trois types de dépendance entre les activités d'un projet de construction :

- la dépendance technique (par exemple, une poutre doit être placée sur des poteaux qui la soutiennent ; sa construction dépend donc de l'achèvement des poteaux concernés) ;
- la dépendance organisationnelle (par exemple, un revêtement de sol peut être posé avant la réalisation du plafond, mais une telle organisation augmente considérablement les risques de dommages sur le revêtement de sol après sa pose) ; et
- la dépendance spatiale (par exemple, alors que la plomberie et les systèmes électriques sont en principe indépendants, leur installation occupe le même espace et l'un doit donc suivre l'autre).

La prise en compte de ces dépendances explique en partie le dilemme de compétence qui rend collaborative la planification de la construction. Sur la base d'une étude des pratiques dans les projets de construction, Laufer et *al.* ont tenté d'identifier les acteurs clés participant à une planification de la construction, en fonction de l'étape du projet et du type de planification (Laufer et

al. 1994). Cette étude montre que la planification est effectivement réalisée de manière collaborative dans une large mesure (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Participants clés à la planification de la construction [adapté de (Laufer et al. 1994)]

Planning	Pré-projet	Pré-construction	Construction
Ingénierie et méthode	PM	GS, DE	PM, GS, PE, DE, SC
Organisation et contrat	PM, HO	PM	PM, HO, GS, PE
Ordonnancement	PM, HO, SC	GS, SC, PM, PE	GS, PE, PM, SC, CL
Coût et flux de trésorerie	PM, HO	PM, SC, GS, HO, CL	PM, PE, GS, HO
Équipement majeur	PM, HO	PM, SC, GS, HO, CL	GS, PM, PE
Aménagement et logistique	PM	GS	GS, PM
Méthodes de travail	HO	GS, PM	GS, PM, SC, PE
Allocation de main d'œuvre	-	SC, GS	GS, PE, PM, SC
Allocation de matériaux	-	GS, PM, SC	GS, PE, SC, PM

Légende :

PM : Gestionnaire de projet ; **SC :** Sous-traitant ; **GS :** Contrôleur général ; **CL :** Maître d'ouvrage ;
PE : Ingénieur de projet ; **DE :** Ingénieur de conception ; **HO :** Siège social.

Les participants sont listés par ordre décroissant de leur effort relatif de planification.

Dans le Tableau 2, les participants sont listés par ordre décroissant de leur effort relatif de planification. Ce qui veut dire que tous les acteurs n'ont pas le même niveau d'implication dans le travail de planification.

Conscient de cette nécessité de collaboration à divers niveaux de la planification de la construction, Verheij et Augenbroe (Verheij & Augenbroe 2006) ont d'ailleurs introduit le concept de planification tactique permettant de créer un lien entre les objectifs stratégiques des partenaires impliqués dans l'activité de planification et leurs besoins opérationnels (voir Figure 14). Selon eux, la planification de la construction est dominée par les « dinosaures » expérimentés de l'industrie de la construction qui, en raison leur expérience, savent distinguer et mettre ensemble les acteurs qu'il faut pour former un partenariat et créer les descriptions les plus mécanistes du projet à exécuter comme la structure de découpage du projet (WBS) et l'ordonnancement. Les connaissances qui sous-tendent ces procédures ne sont généralement pas formalisées.

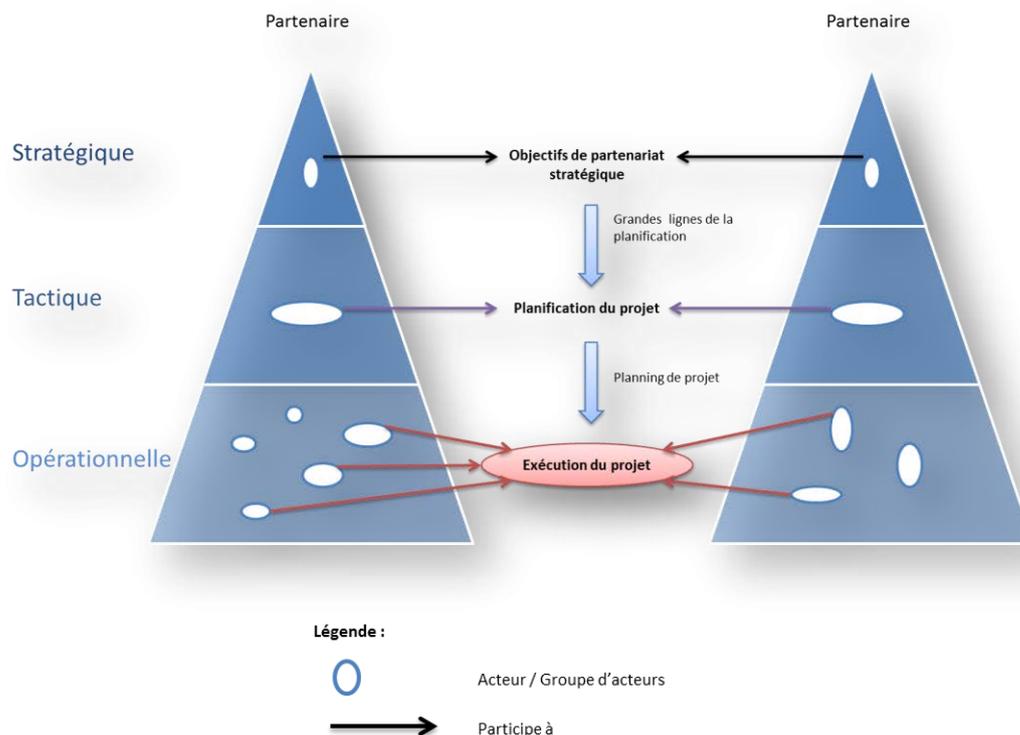


Figure 14 : Planification stratégique, tactique et opérationnelle d'un projet de construction [adapté de (Verheij & Augenbroe 2006)]

Quoi qu'il en soit, il convient de retenir que l'aspect collaboratif de la planification de la construction s'explique par trois besoins majeurs : **1)** le besoin d'agrégier les interrelations et points de vue des participants au projet pour créer un planning cohérent, **2)** le besoin de communiquer entre les acteurs par le biais du planning, et **3)** le besoin de coordonner les activités des différents corps de métier en utilisant le planning comme support.

1.2.2.3 Les modes de représentation du planning

Le Tableau 1 précédemment présenté à la page 46 montre que dans la pratique, plusieurs formats de planning sont utilisés par les professionnels de la construction. Ils disposent en effet, en plus de texte et des tableaux, de plusieurs techniques pour représenter graphiquement le planning. Chacune de ces techniques a un but spécifique généralement différencié par le type d'information qu'elle communique (Patrick 2003). Les professionnels choisissent donc l'une ou l'autre d'entre elles en fonction de leur rôle et de leurs besoins précis. Popescu et Charoenngam (Popescu & Charoenngam 1995) identifient les diagrammes à barres, les diagrammes réseau et la technique de la planification linéaire. Patrick (2003) propose également 3 groupes qui nous semblent plus significatifs: les diagrammes à barres, les diagrammes de séquences et les réseaux temporels.

Les diagrammes à barres : Les diagrammes à barres représentent les données sous forme de barres (horizontales ou verticales) dont les longueurs sont proportionnelles à la durée de l'activité représentée. Dans la forme classique des diagrammes à barres, les liens entre les activités ne sont pas représentés. La variante la plus connue des diagrammes à barres est le diagramme de Gantt, du nom d'Henry L. Gantt l'ingénieur américain qui a développé la technique. Il s'agit de la technique la plus utilisée pour représenter le planning dans le secteur de la construction. Les diagrammes à

barres présentent l'avantage d'être simples et rapides à générer, et facile d'utilisation et d'interprétation. Il s'agit d'un outil de communication à tous les niveaux organisationnels, permettant de représenter en même temps graphiquement les niveaux d'exécution. Comme inconvénients, ils sont difficiles à modifier et peu maniables lorsqu'il s'agit de projets de grande envergure. De plus, ils n'affichent pas le séquençage des activités (relations), ce qui rend très difficile l'identification du chemin critique.

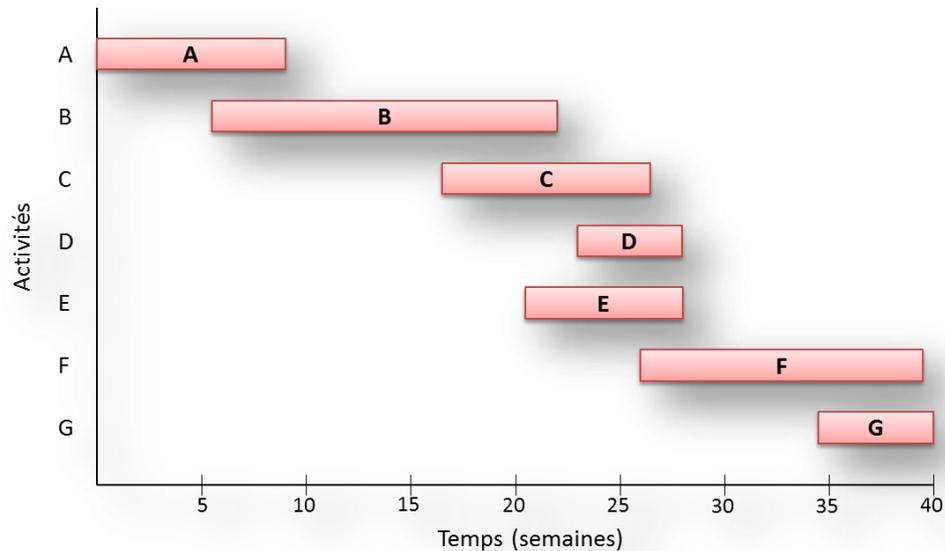


Figure 15 : Exemple de diagramme à barres

Les diagrammes de séquence : Dans cette catégorie, Patrick (2003) distingue les *diagrammes activité-sur-flèche* et les *diagrammes activité-sur-nœud*.

Dans les *diagrammes activité-sur-flèche* (ou *graphe potentiel-tâches*), les activités sont représentées par des flèches et le début et la fin de ces activités sont représentés par des nœuds (voir Figure 16). Les nœuds représentent généralement la fin d'une activité, mais en même temps le début d'une autre activité. Une chose qui caractérise cette technique est l'utilisation d'activités factices pour représenter les relations multiples. Il s'agit de la plus vieille technique de séquençage utilisée dans le secteur de la construction, très bon outil de communication montrant les séquences d'activités. Les dates de démarrages et de fin des activités sont faciles à interpréter. Par contre, l'utilisation d'activités factices peut devenir encombrante et déroutante. Le temps n'y est pas représenté graphiquement et le niveau d'exécution des activités n'est pas visible. Cette technique n'est pas très adaptée aux très grands projets.

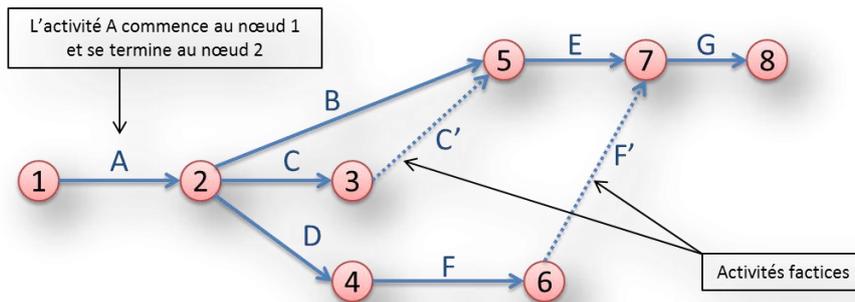


Figure 16 : Diagramme de séquence *activité-sur-flèche* [adapté de (Patrick 2003)]

Les diagrammes *activité-sur-nœud* (ou *graphe potentiel-étapes* ou encore *méthode des diagrammes de priorité*) représentent les activités par des nœuds, les séquences d'activités étant affichées sous forme de flèches (voir Figure 17). La réalisation d'un diagramme *activité-sur-nœud* exige seulement les noms des activités et leur séquençage dans le projet par rapport aux autres activités. La séquence, pour une activité particulière, est désignée par les activités qui la précèdent et qui lui succèdent immédiatement, montrées par une ligne fléchée joignant deux nœuds d'activités. Cette technique a l'avantage de ne pas nécessiter l'utilisation d'activités factices. C'est un bon outil de communication à tous les niveaux organisationnels pour montrer le séquençage des activités, facile d'interprétation et facile à apprendre. Elle a l'inconvénient de ne pas afficher graphiquement le temps et de ne pas montrer le niveau d'exécution du projet.

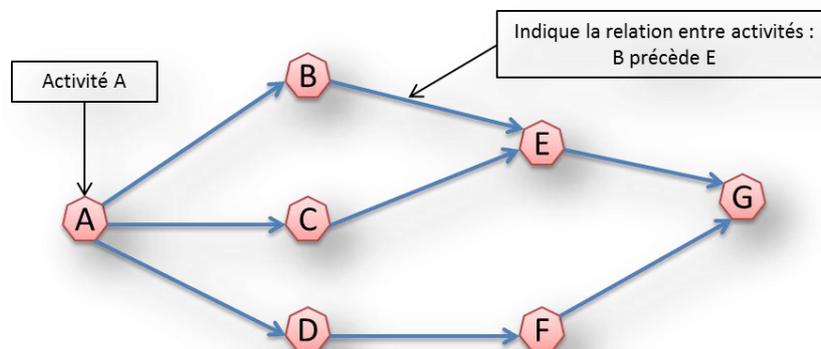


Figure 17 : Diagramme de séquence *activité-sur-nœud* [adapté de (Patrick, 2003)]

Les réseaux temporels : Les réseaux temporels combinent les caractéristiques des diagrammes à barres et des diagrammes de séquence. Deux variantes existent : le format à barres (dans lequel le temps est représenté par des flèches [Figure 18]) et le format *activité-sur-flèche* (dans lequel les flèches représentent les activités [Figure 19]). Les données sont représentées sur un repère orthogonal avec une échelle de temps horizontal représentant le projet où des vecteurs et des nœuds représentent les activités et les longueurs des flèches représentent le temps. La connexion logique entre les activités est ainsi décrite dans un contexte d'échelle de temps où chaque position horizontale représente un point dans le temps. L'avantage de cette technique est de montrer clairement l'ordre et la séquence des activités ainsi que le niveau d'exécution du projet. Mais de tels diagrammes affichent tellement d'informations qu'ils réduisent la communication effective

notamment dans le cas des projets larges et complexes, l'utilisateur étant très vite surchargé. De plus, comme nous l'avons déjà dit plus haut, avec les diagrammes *activité-sur-flèche* l'utilisation d'activités factices peut encombrer la représentation ou prêter à confusion.

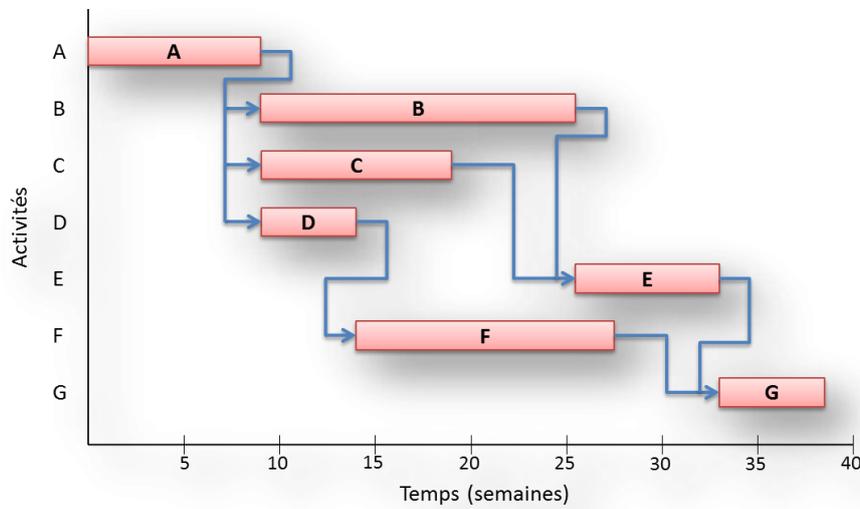


Figure 18 : Réseau temporel – format à barres [adapté de (Patrick 2003)]

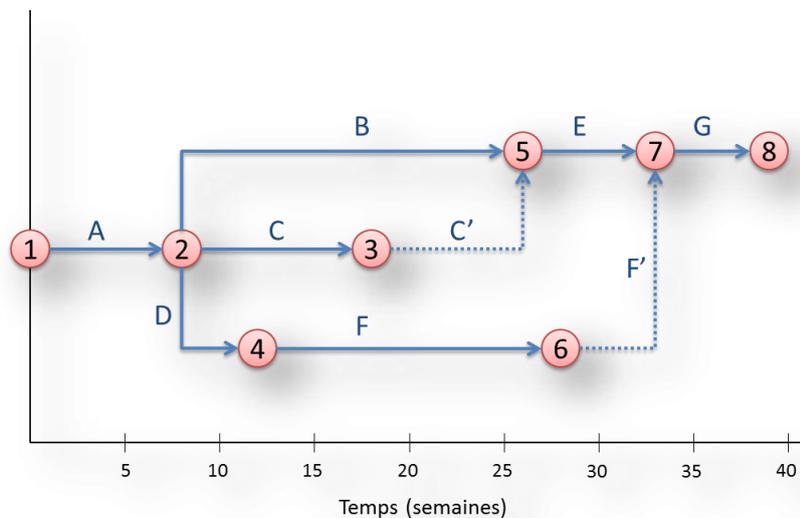


Figure 19 : Réseau temporel – format *activité-sur-flèche* [adapté de (Patrick, 2003)]

Les méthodes de planification vont s'appuyer sur ces modes de représentation du planning. Nous présenterons, dans la suite, les principales méthodes existant dans le secteur de la construction.

1.2.3 Les méthodes de planification de la construction

Les méthodes de planification répondent souvent à des types précis de besoin. Nous proposons de revenir ici sur les plus connues dans le secteur de la construction.

1.2.3.1 La méthode du chemin critique (CPM)

La méthode du chemin critique (*Critical Path Method* ou CPM, en anglais) est une méthode d'analyse de dépendance d'activités dont le but est de déterminer :

- les dates de démarrage et de fin au plus tôt ;
- les dates de démarrage et de fin au plus tard, les flottements ; et
- les activités et/ou les événements qui sont sur le chemin critique.

Elle a été développée dans les années 1950 pour gérer la complexité des dépendances entre les activités d'un projet. Comme nous l'avons dit plus haut (paragraphe 1.2.2.2), ces dépendances peuvent être d'ordre technique, organisationnel ou spatial. Il s'agit de mettre l'ensemble des activités dans un ordre chronologique de manière à former un réseau de dépendances. Une bonne utilisation de la CPM suppose un processus de définition, de séquençage et de représentation des activités du projet et l'assignation des durées de manière à calculer l'ordonnancement optimal. Patrick (2003) identifie un certain nombre d'hypothèses nécessaires pour l'utilisation de la méthode :

- le projet peut être divisé en tâches ou activités bien définies, qui lorsqu'elles sont toutes réalisées marque la fin du projet ;
- les activités du projet sont ordonnées ou suivent une séquence spécifique de travail à réaliser ;
- une activité qui précède immédiatement une seconde activité doit être réalisée avant le démarrage de la seconde activité.
- les activités du projet, une fois définies, doivent être démarrées et stoppées indépendamment les unes des autres, dans une séquence donnée ;
- le temps pour réaliser une activité est connu avec une certitude raisonnable, ou la durée de l'activité est déterministe ou pas très fortement variable. Pour les projets dont la durée est très variable, voir la méthode PERT.
- les entreprises ont des niveaux d'expérience dans la gestion de projets similaires et dans l'estimation ou la détermination des séquences d'activité et des durées ;
- les calculs d'ordonnancement sont, au moins au début, basés sur des durées d'activité fixes et des relations de prédécesseur bien définies. Aucune contrainte de ressource n'est reconnue en dehors de celles imposées par le temps et la séquence de l'activité.

Dans le cadre de la méthode du chemin critique, les diagrammes *activité-sur-nœud* sont les plus à même de faire ressortir le chemin critique. Mais dans la pratique, les professionnels utilisent généralement le diagramme de Gantt. Plusieurs travaux montrent que la CPM est de loin la méthode la plus utilisée dans le secteur de la construction (Galloway 2006; Kelleher 2004; Tavakoli & Riachi 1990). Pourtant, quelques reproches sont souvent faits à cette méthode de planification. Au nombre de ces reproches, il y a d'abord son aspect générique qui s'explique par le fait qu'elle n'ait pas été conçue pour satisfaire les besoins du secteur de la construction (Birell 1980). Une autre critique vient de l'incapacité de cette méthode à décrire graphiquement les ressources nécessaires pour la réalisation du projet (Senior 1998). Pour certains, il y a aussi le fait que la détermination d'un chemin critique uniquement sur la base de la durée des activités est assez réductrice. Ces auteurs estiment en effet que la planification de la construction nécessite d'apporter une attention égale à tous les aspects (durée, coût, ressources, etc.), et de rendre critiques la plupart des activités et des processus (Jaafari 1984). Enfin, il faut noter que l'efficacité de la CPM devient très limitée lorsqu'il s'agit de

planifier l'utilisation des ressources sur des constructions répétitives (Senior 1998). Cela s'explique par deux remarques importantes : 1) cette méthode ne prend pas en compte la localisation des activités et 2) elle utilise des éléments graphiques (flèches, barres, etc.) individuels pour chacune des instances différentes d'une tâche répétitive, ce qui donne finalement lieu à de très larges diagrammes lorsque les tâches sont répétées plusieurs fois.

1.2.3.2 La méthode PERT

La méthode PERT (*Programme Evaluation and Review Technique*) est une méthode mathématique d'analyse d'un réseau d'activités interdépendantes, offrant plus d'options de probabilité que la CPM. Il s'agissait au départ de donner les moyens aux gestionnaires de programme de prédire la probabilité d'atteinte de jalons spécifiques et de prévoir des événements incertains dans les programmes de recherche et de développement de nouveaux produits. Le développement de la technique PERT devait donc être utile dans les cas de planification où aucun historique de coût ou de temps n'est disponible.

Comme la CPM, la méthode PERT utilise des diagrammes logiques pour analyser les temps de réalisation. Elle se concentre sur les événements (nœuds) qui doivent se produire avant la fin réussie d'un projet. Le résultat du PERT, c'est la probabilité d'atteindre les performances de toutes les activités qui définissent un événement. Alors que la méthode du chemin critique traite individuellement les activités composant le projet, la méthode PERT met l'accent sur les événements. C'est la raison pour laquelle elle est considérée comme étant « orientée-événement » tandis que la CPM est dite « orientée-activité ». Dans un modèle PERT, des flèches indiquent la durée des tâches dont elles représentent les enchaînements, alors que les événements (nœuds) se rapportent à la situation du projet à un moment donné.

La réalisation d'un modèle PERT exige trois estimations différentes de la durée de l'activité – le *moment optimiste* (T_a), le *moment le plus probable* (T_m) et le *moment pessimiste* (T_b) – pour calculer les limites statistiques décrivant la durée de l'activité et la distribution. La durée espérée (ou temps moyen espéré [T_e]) est donnée par la formule :

$$T_e = \frac{T_a + 4 \times T_m + T_b}{6}$$

Pour chaque activité avec ces trois estimations, la probabilité pour toutes les durées possibles est supposée être distribuée comme le montre la Figure 20.

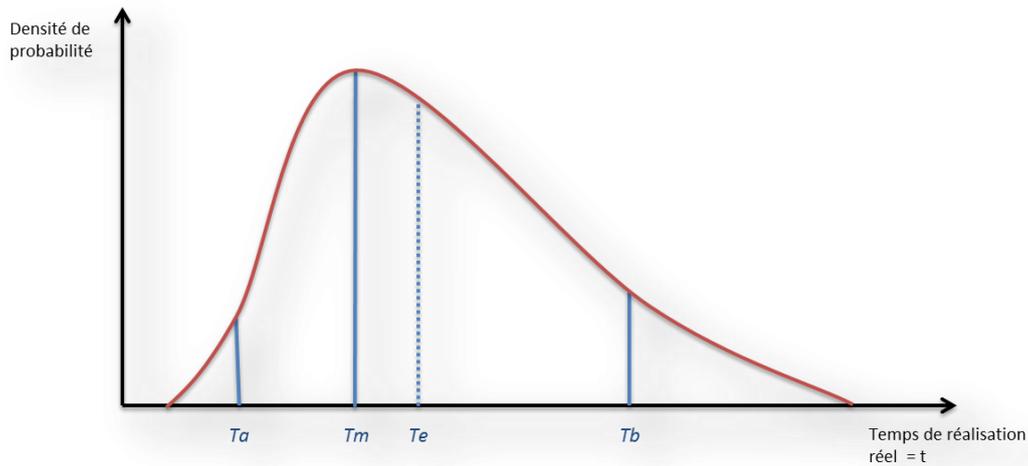


Figure 20 : Système PERT des trois différentes estimations [adapté de (Popescu & Charoenngam 1995)]

Dans la mise en œuvre pratique de cette méthode, les professionnels construisent un réseau PERT en décrivant les événements importants du projet résultant de la réalisation des activités prévues. A cet effet, ils décrivent ces événements à partir des éléments de la Figure 21.

Numéro de l'événement	Durée de l'activité
Nom de l'événement	
Date optimiste	Date au plus tard

Figure 21 : Description d'une activité pour la construction d'un réseau PERT

Les événements décrits représentent les nœuds qui seront reliés par des flèches (correspondant à la durée des activités) de manière à traduire les interdépendances entre ces événements et la durée des activités nécessaires (Figure 22). Cette forme de représentation permet d'identifier le chemin critique.

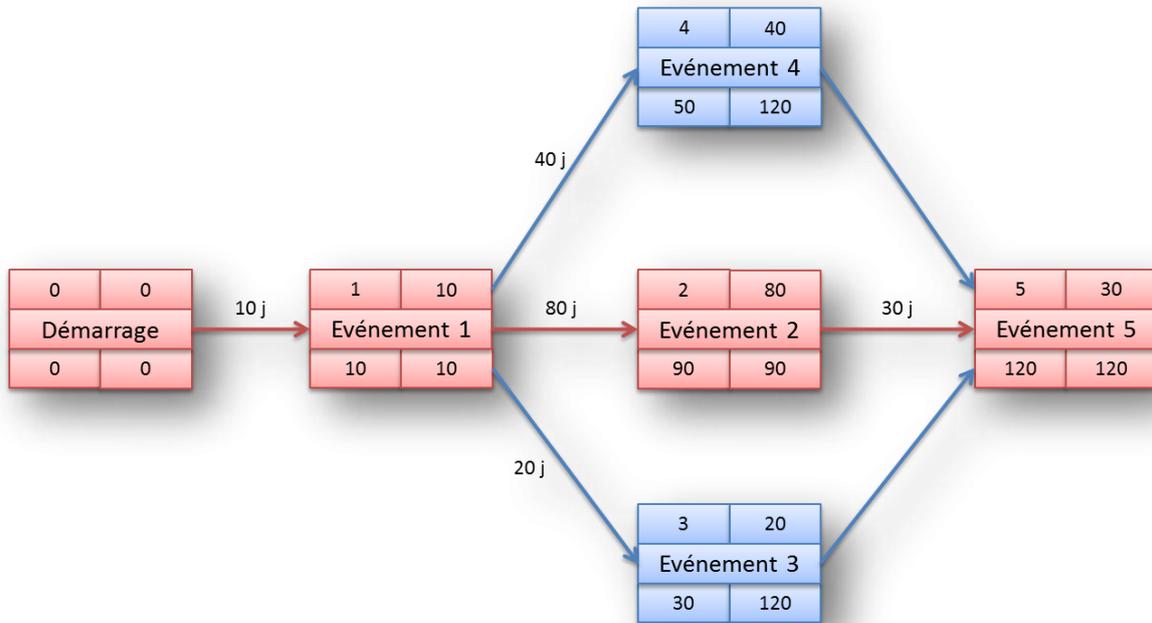


Figure 22 : Exemple de réseau PERT (le chemin critique est en rouge)

1.2.3.3 Les méthodes pour les projets linéaires

Les projets de construction linéaires sont des projets ayant un groupe d'opérations impliquant des « unités » répétitives d'éléments de construction (Arditi & Tokdemir 2002). Ces projets se composent donc d'un ensemble d'activités qui sont répétées sur plusieurs emplacements (lieux, localisations) tout au long de la durée des travaux (Mattila & Abraham 1998). Des exemples typiques de projets de construction linéaires sont les canalisations, les tunnels, les routes, etc. Les gratte-ciel sont de plus en plus classés dans cette catégorie du fait de leur hauteur et de la nature répétitive des activités entrant dans le cadre de leur construction. La planification de tels projets nécessite la prise en compte de la continuité dans la réalisation des travaux de manière à permettre aux équipes de se déplacer sans subir d'interférence. Or, comme nous l'avons dit, la méthode du chemin critique ne prend pas en compte l'aspect spatial de la construction ni même la localisation des activités. Plusieurs techniques ont donc été proposées depuis les années 1960 pour planifier les projets de construction linéaires. Nous pouvons citer la *Linear Scheduling Method* (Johnston 1981), la *Line of Balance* (Lumsden 1968), la *Vertical Production Method* (OBrien 1975), la *Time Space Scheduling Method* (TSSM), les *Time Versus Distance Diagrams*, les *Linear Balance Charts*, le *Disturbance Scheduling* et les *Velocity Diagrams*, le *Repetitive Project Modelling*, la *Repetitive Scheduling Method*, etc. On voit bien qu'il y a une multitude de méthodes proposées. En réalité, il s'agit de plusieurs variantes des deux principales familles de méthodes que sont la *Line of Balance* (LOB) et la *Linear Scheduling Method* (LSM).

Linear Scheduling Method (LSM) : Les méthodes LSM sont des techniques graphiques qui utilisent un repère où le temps est représenté sur un axe et la localisation sur l'autre axe. Les activités sont ainsi positionnées dans le temps et l'espace en fonction de leur durée prévue et leur taux de production.

La pente d'un tracé de ligne correspond au taux de la production de l'activité. Les activités ayant les taux de production les plus faibles sont les activités critiques (Figure 23).

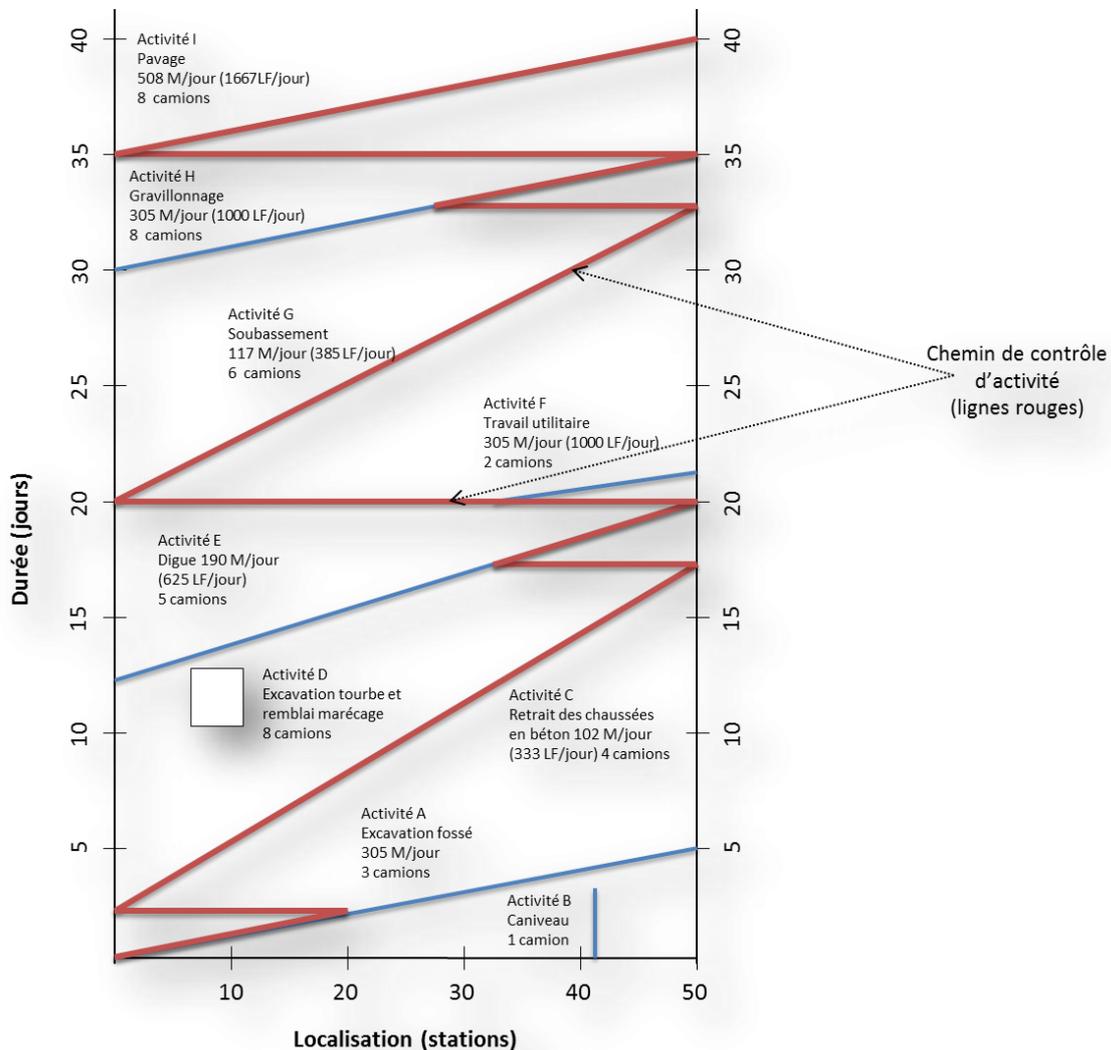


Figure 23 : Un exemple type de LSM [adapté de (Mattila & Abraham 1998)]

Il faut noter qu'il n'existe pas vraiment de méthode formellement développée permettant aux techniques basées sur la LSM de déterminer les incertitudes relatives au temps de réalisation. De plus, ces techniques ont des capacités limitées en ce qui concerne l'amélioration de la production par changement des ressources. Une autre critique concerne le manque d'outils informatiques utilisant ces techniques.

Line of Balance (LOB) : la méthode LOB est une variante de la méthode de planification linéaire qui permet l'équilibrage des opérations de manière à ce que la construction soit effectuée en continu. Elle a été développée dans les années 1950 par la marine américaine pour suivre certains types de projets où la livraison d'un élément est contrôlée, de manière à comparer la quantité livrée à la quantité planifiée. La différence entre la LOB et la LSM concerne l'information sur laquelle chacune de ces deux méthodes met l'accent. Si les techniques LSM mettent l'accent sur la représentation de l'espace et du temps, la LOB se concentre beaucoup plus sur la représentation de l'avancement et la

ligne d'équilibrage. La méthode LOB utilise le principe du management par exception et fait abstraction des éléments non essentiels de la construction de manière à considérer des unités types répétitives. Elle est ainsi très utile pour la planification de maisons répétitives ou de gratte-ciel où des étages types sont répétés. La méthode LOB permet une meilleure compréhension d'un projet composé d'activités répétitives que n'importe quelle autre technique, parce qu'elle donne la possibilité d'ajuster les taux production des activités (Arditi & Tokdemir 2002). La Figure 24 présente un exemple de planification avec la méthode LOB.

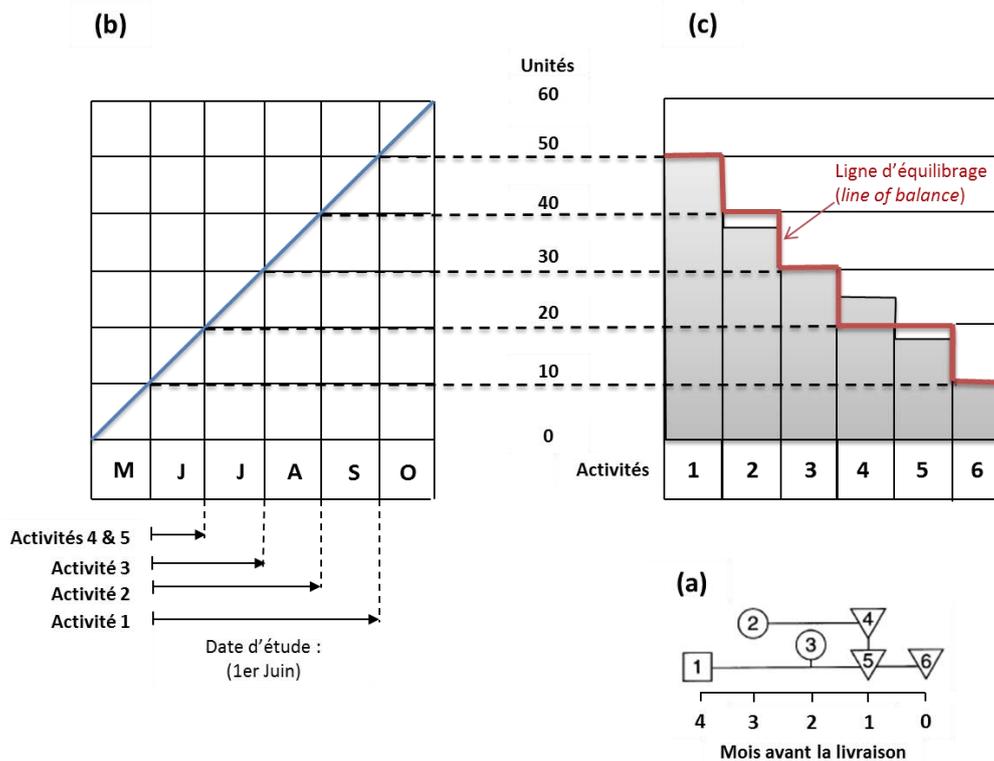


Figure 24 : Exemple de planification avec la méthode LOB : (a) Réseau unitaire (planning de production) ; (b) Diagramme des objectifs (cumulés) ; (c) Diagramme d'avancement [adapté de (Mattila & Abraham 1998)]

Au nombre des critiques faites à la méthode LOB, il y a le fait qu'elle suppose que les taux de production sont linéaires (taux de production constants à travers le temps) alors que, à cause de la nature stochastique du processus de construction, l'hypothèse de taux de production linéaire des projets et processus de construction peut être erronée (Lutz & Hijazi 1993). Pour Lutz & Hijazi (1993) il y a aussi le fait que l'objectif de la plupart des techniques basées sur le concept LOB est de réduire la durée du projet sans grande attention sur le coût du projet. Enfin, il faut souligner que la méthode LOB n'est pas très connue et qu'il n'existe pas beaucoup d'outils informatiques commercialisés l'utilisant.

1.2.3.4 Les nouvelles approches de planification

Face aux limites des méthodes traditionnelles de planification, de nouvelles approches ont vu le jour. Il s'agit, dans la plupart des cas de tentatives d'adaptation de méthodes existant dans d'autres domaines industriels. Au nombre de ces approches, il nous semble intéressant de citer :

Le Last Planner System (LPS) : L'objectif du Last Planner System (Ballard 2000) est d'appliquer au secteur de la construction les principes du Lean pour le contrôle de la production (Lean Construction). Le Lean est une « méthodologie visant à éliminer les tâches sans valeur ajoutée (les pertes), à simplifier les processus en augmentant la fluidité, la flexibilité, l'agilité, avec pour objectif d'accroître la valeur pour le client (valeur définie par le client) et de contribuer ainsi à l'amélioration des performances de l'entreprise » (AFITEP-AFNOR 2010). Les origines du Lean Construction remontent aux années 1990 avec la constitution groupe de travail international (*International Group for Lean Construction*). Selon Sacks et Partouche, « l'un des défis de l'application du Lean Construction est d'identifier les bonnes méthodes pour faire face à une industrie qui n'a pas évolué de l'artisanat à la construction de masse » mais qui resté mélangé entre l'artisanat et la construction de masse (Sacks & Partouche 2010).

Le LPS met l'accent sur la planification collaborative associant l'équipe de coordination des travaux et l'ensemble des responsables d'équipes dès le début du projet. Chacun est amené à discuter avec les autres et à analyser les risques de marge dans le but de promettre des délais d'achèvement réalistes des travaux. L'objectif principal est d'avoir les tâches achevées comme promises en mettant l'accent sur plus de conversation, plus d'engagement et plus de travail d'équipe de la part des responsables d'équipes. Des réunions hebdomadaires sont prévues pour étudier ensemble les interdépendances et planifier les activités de la semaine. Une particularité des réunions du LPS est l'utilisation de papier Post-it de différentes couleurs par les différents acteurs et d'un formulaire de planification approprié (le formulaire WWP [*Weekly Work Plan*]).



Figure 25 : Séance de planification avec la méthode du Last Planner System

L'avantage principal du Last Planner System réside dans son aspect collaboratif, notamment le fait de prendre très tôt en compte les points de vue des différents acteurs dans l'élaboration du planning. Cela permet bien évidemment d'être plus réaliste, mais aussi d'éliminer les gaspillages de ressource

et de temps. Toutefois, dans la pratique, il peut s'avérer impossible de réunir les responsables d'équipes très tôt dans la planification, car les sous-traitants sont assez rarement connus en phase de planification du projet.

La méthode de la chaîne critique : Proposée par Goldratt en 1997, la méthode de la chaîne critique permet la détermination de la chaîne critique qui est définie comme étant « Enchaînement des tâches d'un projet dont la durée est la plus longue et n'utilisant pas les mêmes ressources au même moment » (AFITEP-AFNOR 2010). Il s'agit d'une application de la théorie des contraintes (TOC) à la gestion de projets, de manière à intégrer les théories des sciences du comportement à la gestion du temps. À cet effet, la méthode de la chaîne critique encourage la réduction des risques par l'estimation optimiste de la durée des tâches et l'insertion de « tampons » et par la prise en compte des limitations de ressources lors de l'ordonnancement des activités (Sriprasert & Dawood 2003).

La construction virtuelle : Grâce aux avancées technologiques, la construction virtuelle est de plus en plus utilisée dans le secteur de la construction pour améliorer la communication et évaluer la constructibilité et les contraintes physiques dans l'ordonnancement des activités. La simulation 4D et la Réalité Virtuelle sont les deux grandes approches introduites et qui semblent avoir de plus en plus de succès. La simulation 4D associe un modèle 3D à l'ordonnancement des activités de manière à simuler le processus de la construction à travers le temps. La Réalité Virtuelle quant à elle crée une simulation interactive immersive de l'ouvrage à construire de manière à permettre aux acteurs d'interagir ou de simuler des aspects de la construction.

Nous proposons le tableau suivant (Tableau 3) pour résumer les méthodes de planification de la construction présentées dans cette section.

Tableau 3 : Résumé des principales méthodes de planification de la construction

Catégories	Méthodes de planification	Principales caractéristiques
Méthodes classiques	Méthode du Chemin Critique (CPM)	<ul style="list-style-type: none"> - Cette méthode est de loin la plus utilisée dans le secteur - Les activités sont définies pour démarrer et s'arrêter indépendamment les unes des autres - Le temps pour réaliser une activité est connue avec une certitude raisonnable - Aucune contrainte de ressource n'est reconnue en dehors de celles imposées par le temps et la séquence - Les diagrammes de Gantt sont les plus utilisés
	Méthode PERT	<ul style="list-style-type: none"> - Cette méthode vise l'étude de la probabilité d'atteindre la réalisation de toutes les activités prévues - La réalisation d'un modèle PERT exige 3 estimations : le moment optimiste, le moment probable, le moment pessimiste - Cette méthode utilise des réseaux PERT qui sont des diagrammes de type <i>activité-sur-flèche</i> - Les réseaux PERT permettent d'identifier le chemin et les activités critiques.
Méthodes pour les projets linéaires	Linear Scheduling Method (LSM)	<ul style="list-style-type: none"> - Cette méthode est adaptée aux projets exécutés le long d'un trajet /espace linéaire (routes, chemin de fer, etc.) - Dans ces projets, la continuité des travaux est cruciale pour un rendement efficace - Les activités ayant les taux de production les plus faibles sont les activités critiques - Cette méthode utilise un réseau temporel affichant la localisation des activités et leurs taux de production
	Line Of Balance (LOB)	<ul style="list-style-type: none"> - Cette méthode est adaptée à des projets où le produit final est un groupe d'unités similaires (gratte-ciel, etc.) - Dans ces projets, les mêmes activités sont répétées durant toute l'exécution - Il est fait abstraction des éléments non essentiels de la construction (seuls des unités types répétitives sont considérées) - Cette méthode utilise un réseau temporel permettant de rééquilibrer les activités de manière à ce que le projet s'exécute de façon linéaire
Nouvelles approches	Last Planner System (LPS)	<ul style="list-style-type: none"> - Application au secteur de la construction des principes du Lean - L'équipe de coordination des travaux et l'ensemble des responsables d'équipes sont associés dès le début du projet - L'objectif principal est d'avoir assez tôt le point de vue des différents acteurs et construire le planning le plus réaliste possible - Cette méthode utilise des formulaires WWP et de papiers Post-it
	Méthode de la Chaîne critique	<ul style="list-style-type: none"> - Application de la théorie des contraintes à la gestion de projet - Encourage la réduction des risques par l'estimation optimiste de la durée des activités - Utilisation de tampons et prise en compte des limitation de ressources
	Construction virtuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Cette méthode représente visuellement l'ouvrage à construire en 3D - Elle est utilisée pour améliorer la communication - Elle permet l'évaluation de la constructibilité et des contraintes spatiales - Deux approches de visualisation sont utilisées : la CAO 4D et la Réalité Virtuelle

◆ **Retenons, avant d’aller plus loin :**

- 1) La planification de la construction est caractérisée par un certain nombre de multiplicités (différents buts, utilisateurs, méthodes, formats et modes de représentation)
- 2) La planification de la construction est une activité largement collaborative.
- 3) Les méthodes de planification correspondent à des besoins de planifications différents et chacune d’entre elles utilise un mode de représentation adapté.
- 4) Les professionnels choisissent l’une ou l’autre des méthodes existantes en fonction de leurs besoins spécifiques liés à leur rôle sur le projet.

1.3 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons fait le point des pratiques et des enjeux liés à la planification de la construction. En partant des principes de base de gestion de projet, nous avons décrit le secteur de la construction et évoqué les caractéristiques qui rendent particuliers les projets de construction. Il y a d’abord le fait que les projets de construction sont toujours des travaux différents avec des objectifs, des configurations de ressources et des environnements uniques. Il y a aussi la complexité des projets et l’incertitude qui peut les caractériser. Il y a enfin la fragmentation, le fonctionnement assez particulier de la chaîne de production et le besoin de faire collaborer des acteurs avec des intérêts et des points de vue différents et souvent divergents, réunis le temps d’un projet.

La réussite d’un projet de construction peut être mesurée avec des indicateurs de performance objectifs (durée, vitesse, taux d’accident, coût, etc.) ou subjectifs (qualité, fonctionnalité, satisfaction, etc.). Le poids de ces indicateurs correspond à celui des objectifs de performance du projet. Ces objectifs de performance sont de trois ordres (budgétaire, de calendrier ou de qualité) et dépendent de facteurs de succès qui peuvent être reliés aux fonctions managériales du projet. Ainsi, il est possible aux gestionnaires ou coordinateurs de mettre l’accent sur l’un ou l’autre des facteurs de succès, en fonction des objectifs. La planification, considérée par beaucoup comme étant la compétence centrale de la gestion de projet, est la plus importante des fonctions managériales des projets de construction puisqu’elle a la capacité d’augmenter ou de réduire considérablement les chances de réussite.

La planification de la construction est essentiellement caractérisée par quatre types de multiplicité. En effet, elle traite différents buts et diverses utilisations, nécessite différents plannings sous divers formats, nécessite différents timings portant sur divers horizons de temps, et implique différents participants et différents modes de préparation.

Une bonne planification de la construction demande donc une bonne compréhension des buts pour les utilisateurs du planning, la collaboration de plusieurs participants, mais aussi le choix des techniques de représentation du planning les plus adaptées aux besoins des utilisateurs.

Plusieurs méthodes de planification existent dans le secteur de la construction. Ces méthodes utilisent des modes des représentations particuliers, correspondant à des besoins particuliers. Par ailleurs, la plupart de ces méthodes ne prennent pas en compte l'aspect spatial de la construction. Ceci explique en grande partie l'intérêt grandissant pour la simulation 4D.

Dans le chapitre suivant, nous reviendrons sur la simulation 4D, et nD, dont nous définirons le principe et l'intérêt pour le secteur, avant de formuler notre problématique dans le cadre de la présente thèse.

CHAPITRE 2

LA SIMULATION 4D/ND POUR PLANIFIER LA CONSTRUCTION : UN BESOIN DE COLLABORATION ET DE VUES ADAPTÉES



"He who fails to plan, plans to fail."

Winston Churchill

2 La simulation 4D/nD pour planifier la construction : un besoin de collaboration et de vues adaptées

Nous présentons dans ce chapitre la problématique, l'hypothèse et l'objectif de la présente thèse. Dans un premier temps, nous formulons la problématique en définissant la simulation 4D de la construction, son utilisation collaborative et le besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D. Pour mieux positionner cette problématique, nous étudions dans la deuxième partie quelques travaux similaires aussi bien dans le domaine de la construction que dans les méthodes d'ingénierie des interfaces homme-machine.

2.1 La simulation 4D de la construction

2.1.1 Qu'est-ce que la simulation 4D ?

Dans le chapitre précédent, nous avons évoqué la simulation 4D parmi les méthodes innovantes de planification de la construction. Nous revenons ici sur ses principes de base, sur le passage de la 4D vers la nD et sur l'intérêt de la simulation 4D/nD.

2.1.1.1 La quatrième dimension dans la construction

Le dessin 2D est de loin la technique la plus utilisée dans le secteur de la construction pour représenter l'ouvrage à construire. Nous nous basons sur Collier et Fischer (Collier & Fischer 1995) pour identifier quelques causes. Parmi elles, il y a le fait que :

- les plans 2D sont le moyen le plus économique pour véhiculer l'information relative à la géométrie d'une structure ;
- les concepteurs peuvent esquisser sur n'importe quel bout de papier de nouvelles idées, même concernant des ouvrages tridimensionnels ;

- les perspectives, l'isométrie et d'autres méthodes géométriques sont largement utilisées dans le secteur de la construction pour représenter des objets tridimensionnels sur des surfaces plates ;
- la conception de représentations 3D complètes pour des projets complexes peut s'avérer très compliquée et coûteuse, surtout avant l'avènement des outils informatiques dans le secteur ;
- les acteurs sont formés depuis toujours à l'utilisation des plans 2D.

Mais cette forme de représentation 2D n'est pas sans limites. Parmi les principales limites, il y a celle relative à l'interprétation des acteurs qui doivent chacun se faire une représentation mentale tridimensionnelle de l'ouvrage. Il arrive très fréquemment que les différents acteurs aient différentes interprétations de la même représentation (Figure 26).

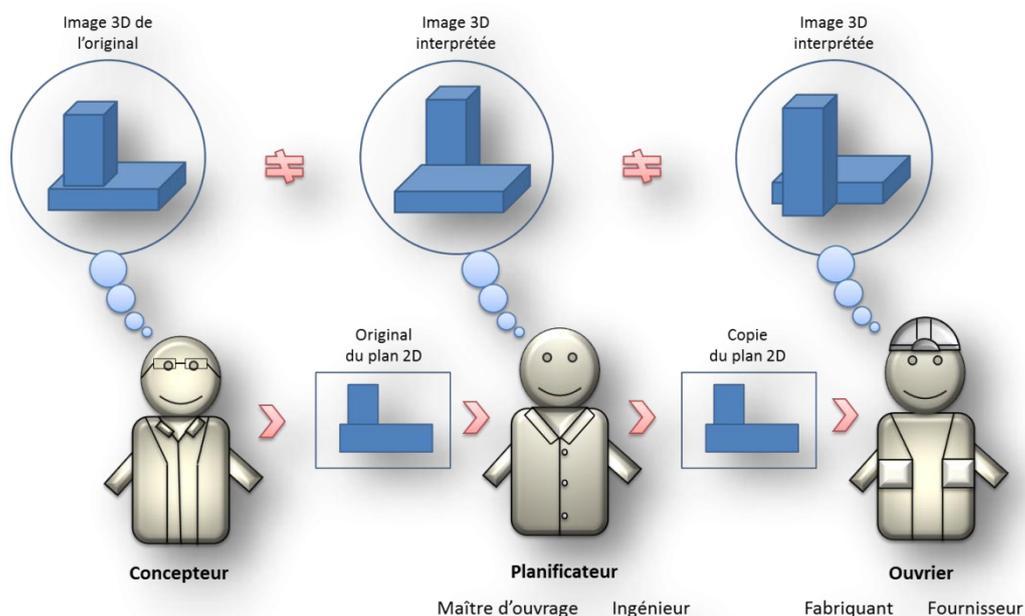


Figure 26 : Différentes interprétations de la même représentation 2D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]

Dans les projets de construction, il est souvent nécessaire d'avoir recours à de l'information en trois dimensions pour compléter la perception de l'objet représenté sur les plans 2D. Selon Collier et Fischer (Collier & Fischer 1995), ceci est principalement dû au fait que l'environnement même de la construction est fait d'objets tridimensionnels et, de ce fait, la 3D semble être naturellement la meilleure manière de les représenter. Les architectes y sont familiers puisqu'ils conçoivent des espaces qui sont par nature tridimensionnels. Ils utilisent d'ailleurs couramment des maquettes 3D en carton pour communiquer et vérifier certains aspects de leur création.

L'arrivée des outils informatiques dans le secteur tend à faciliter la production des représentations tridimensionnelles (3D) qui, sans vraiment remplacer les plans 2D actuels, deviennent de véritables outils de vérification et de communication. Ce type de représentation commence donc à prendre de plus en plus de place dans les projets de construction, entraîné notamment par :

- l'essor des programmes informatiques de conception assistée par ordinateur (CAO) intégrant des services de visualisation 3D ;
- la recherche d'une solution à la question récurrente de l'interopérabilité des formats d'échange ayant conduit à l'adoption et à l'effort de popularisation de la maquette numérique (BIM) et du format de description des ouvrages de bâtiment IFC.
- La communication basée sur un modèle 3D est beaucoup plus efficace que celle basée sur les plans 2D parce qu'elle permet de lever les mauvaises interprétations des acteurs (Figure 27).

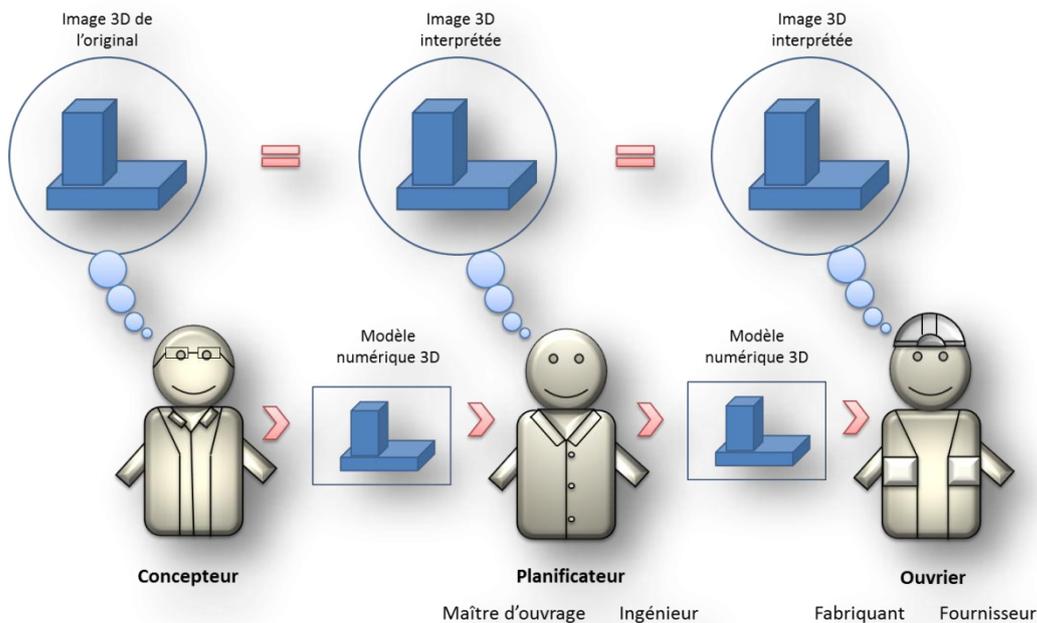


Figure 27 : Communication basée sur un modèle 3D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]

Pourtant, la 3D ne semble pas suffisante pour refléter le processus de construction. Selon Collier et Fischer (Collier & Fischer 1995), si l'environnement de la construction est composé d'objets tridimensionnels, la construction elle-même est en 4D. Comme nous avons pu le comprendre dans le chapitre précédent, une opération de construction est un ensemble de séquences d'activités réalisées par différents acteurs et à l'issue desquelles l'ouvrage change à chaque fois d'état (Figure 28). C'est d'ailleurs ce qui explique l'importance de la notion de niveau d'exécution dans le secteur : l'ouvrage change d'état en fonction de son niveau d'exécution. Ainsi donc, un modèle 3D, aussi élaboré soit-il, ne saurait vraiment communiquer une telle évolution de l'ouvrage, s'il est statique. D'où la nécessité d'intégrer une quatrième dimension (temporelle) qu'on retrouve dans l'ordonnancement des travaux. Il est ainsi possible de simuler le processus de construction en fonction du temps. Telle est la motivation de l'ajout d'une quatrième dimension telle que présentée par Collier et Fischer (Collier & Fischer 1995).

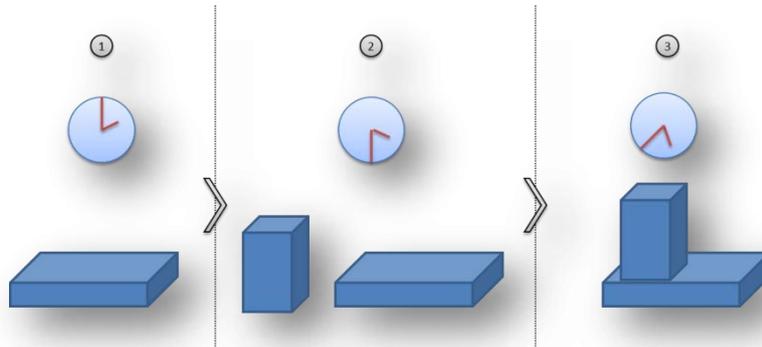


Figure 28 : Séquence de construction [adapté de (Collier & M. Fischer 1995)]

2.1.1.2 Principes et définitions de la CAO 4D

Comme nous avons pu le voir au point précédent, la 4D consiste donc à associer la dimension temporelle (planning) à un modèle 3D de l'ouvrage à construire de manière à en simuler la construction à travers le temps. Il s'agit en réalité d'avoir un modèle 3D par unité de temps choisi, de manière à avoir pour chaque moment choisi la possibilité de voir l'état de la construction. Une animation 4D simule donc le processus de transformation de l'espace à travers le temps et reflète la nature quadridimensionnelle de l'ingénierie et de la construction (McKinney et *al.* 1996). Conceptuellement, produire une animation 4D revient donc à associer un modèle 3D avec un ordonnancement des activités (Figure 29). Un tel processus de liaison donne un modèle 4D qui représente le modèle de l'ouvrage à réaliser et intègre en même temps les informations traditionnellement représentées dans l'ordonnancement de la construction (McKinney et *al.* 1996).

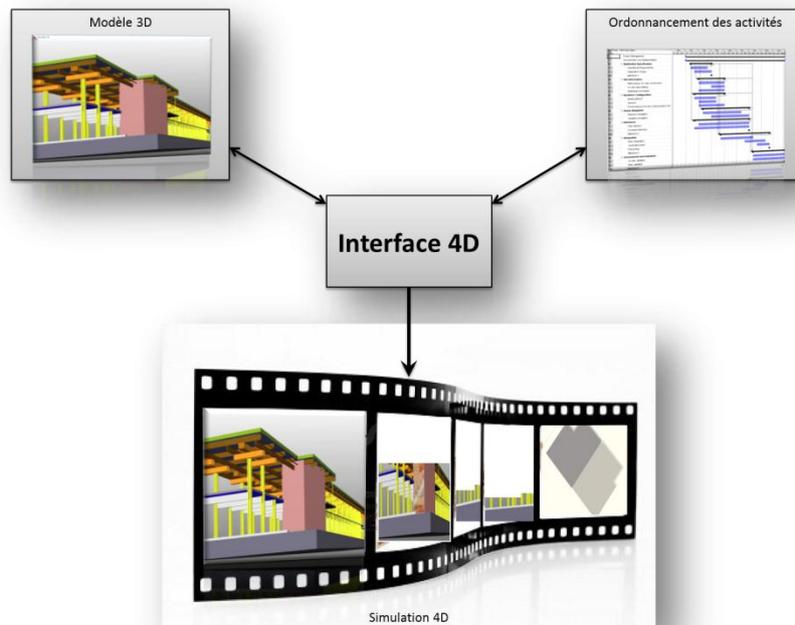


Figure 29 : Composantes d'une simulation 4D [adapté de (McKinney et *al.* 1996)]

La **CAO 4D** consiste donc à associer l'ordonnancement des activités à un modèle 3D et obtenir un **modèle 4D** se présentant généralement sous la forme d'une séquence d'animation dans laquelle les étapes de la construction défilent en fonction du temps. Pour cette raison, il est courant de parler d'**animation 4D**. La réalisation d'un modèle 4D se justifie en général par un besoin de simulation du processus de la construction, de manière à détecter et anticiper les problèmes de mise en œuvre : on parle à cet effet de **simulation basée CAO 4D** ou plus simplement de **simulation 4D**. L'intérêt visuel dans la simulation 4D de la construction est tellement important qu'il n'est pas rare d'utiliser l'expression **visualisation 4D** pour la désigner.

2.1.1.3 De la 4D à la nD

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les besoins de planification de la construction ne se résument pas à l'ordonnancement des tâches, mais peuvent également concerner l'optimisation de l'utilisation des ressources. L'avancée de la technologie permet désormais d'utiliser la simulation 4D à cet effet. Dans cette logique, il est de plus en plus courant de voir les modèles 4D s'étendre pour devenir des modèles nD, n étant supérieur à 4. Dans cette logique, il est communément admis qu'en ajoutant des informations liées aux coûts des ouvrages (réalisation, matériaux, etc.) à un modèle 4D, on parle de modèle 5D. Un modèle 6D est ensuite obtenu en ajoutant au modèle 5D les autres ressources nécessaires. Pour résumer, nous avons :

- Modèle 4D = Modèle 3D + Planning
- Modèle 5D = Modèle 3D + Planning + Coût
- Modèle 6D = Modèle 3D + Planning + Coût + Autre ressource

Un modèle nD correspond donc à un modèle 3D auquel l'on associe (n-3) autres dimensions correspondant à des objectifs de planification. Lee et *al.* (2005) identifient huit dimensions possibles qui sont :

- la prévision et la planification du processus de construction ;
- la détermination des options de coûts ;
- la maximisation de la durabilité (*sustainability*) ;
- l'étude des exigences énergétiques ;
- l'examen de l'accessibilité des personnes ;
- la détermination des besoins d'entretien ;
- l'intégration des fonctionnalités de dissuasion de la criminalité ;
- l'examen de l'acoustique du bâtiment.

Avec l'essor du Building Information Model (BIM) et l'adoption du format IFC pour régler le problème de l'interopérabilité des formats d'échanges, la modélisation nD se sert généralement du BIM pour permettre l'utilisation d'un modèle 3D global intégrant des informations du bâtiment utilisables par la plupart des acteurs du projet, de manière interopérable (Zhou 2009). Nous reviendrons plus loin (paragraphe 2.1.3.3) sur ce lien entre le BIM et la simulation 4D/nD.

2.1.1.4 Intérêt de la simulation 4D/nD

Un défaut important des méthodes de planification classiques réside dans le fait qu'elles ne permettent pas une perception spatiale de l'ouvrage. La planification 4D permet de pallier cette insuffisance dans la mesure où un modèle 3D est directement lié au planning. En termes de

visualisation, il s'agit d'un apport très intéressant qui devrait permettre aux acteurs de visualiser directement l'ouvrage et identifier les problèmes spatiaux liés notamment à la mise en œuvre. Un autre intérêt évident de la CAO 4D pour planifier la construction est qu'elle devrait permettre à chaque participant au processus de construction de visualiser, non pas forcément tous les éléments de l'ouvrage incluant ceux qui ne l'intéressent pas, mais les éléments correspondant à son intérêt en fonction de son rôle et de l'état de l'ouvrage au moment où il intervient (Figure 30).

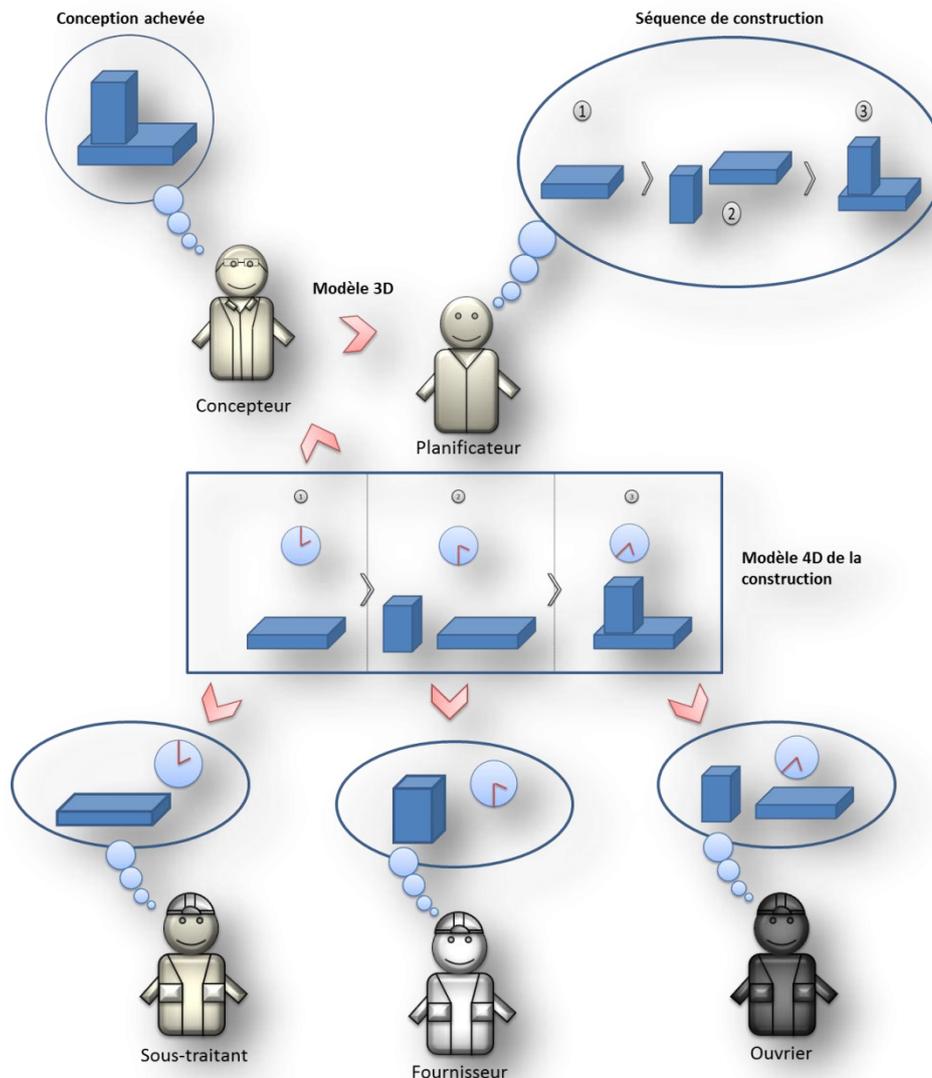


Figure 30 : Planification de la construction avec un modèle 4D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]

Mackinney et *al.* (1996) identifient trois grandes catégories de problèmes dans le processus de conception dans la construction, que la CAO 4D pourrait combler. Il s'agit de :

- l'incapacité à identifier les problèmes de mise en œuvre avant la phase de construction : pour illustrer ce problème, les auteurs prennent l'exemple d'une réunion de coordination pour une installation de toiture entre l'entreprise générale et les sous-traitants de tôle, de couverture et de stuc. Ils découvrent que le détail du rebord du toit, comme prévu, nécessitait un changement dans la séquence de construction prévue ;

l'outil de CAO 4D leur permet ainsi de s'interroger sur l'intention de conception, analyser la séquence de construction, et implémenter des changements qui améliorent la productivité et la coordination du chantier ;

- le manque d'information pour la planification de la construction : la documentation 2D traditionnelle ne fournit aucune information sur le séquençage des activités et les calendriers d'installation pour les éléments de conception spécifiques. Les ordonnancements de la construction fournissent rarement les détails supplémentaires nécessaires au personnel de construction pour orchestrer la mise en place réelle sur chantier des composantes de la conception. Par conséquent, les procédures d'appel d'offres s'appuient sur l'expérience des entrepreneurs pour tenir compte de facteurs au-delà de l'information de conception. L'outil 4D-CAD simule le processus de construction, et encourage la planification préalable aux premiers stades, lorsque des solutions optimales peuvent être planifiées et mises en œuvre ;
- le fait que les clients ne sont souvent pas toujours capables d'interpréter la documentation du projet : dans une étude de cas réel de construction (Centre de santé du comté de San Mateo), les auteurs ont très vite réalisé que la documentation de conception disponible était insuffisante dans la communication du processus de construction proposé au client. Le projet de remodelage et de rénovation prévoyait la construction de cinq nouveaux bâtiments, la démolition de trois bâtiments existants, et la rénovation de l'hôpital principal existant. En raison de la nature complexe et multiphase du projet, une représentation visuelle claire a été nécessaire pour veiller à ce que des questions telles que les flux de trafic, le confinement des opérations perturbatrices et la coordination générale soient complètement résolues. Le modèle de CAO 4D a contribué à assurer au client que les travaux de construction n'allaient pas interrompre les activités quotidiennes de l'hôpital.

D'un point de vue plus général, nous avons identifié plus haut (paragraphe 1.2.1.1, page 43) les cinq principaux buts de la planification de la construction : l'exécution, la coordination et la communication, le contrôle, la prévision, et l'optimisation. Nous avons montré (paragraphe 1.2.1.2, page 44) que ces buts se rapportent essentiellement à deux types de processus à planifier : les processus de base (portée, durée et ordonnancement, coûts, risques, intégration) et les processus de facilitation (qualité, ressources, communication). La simulation 4D est utile pour gérer la planification de la portée, de la durée et l'ordonnancement. En passant de la simulation 4D à la simulation nD (voir paragraphe 2.1.1.3, page 73), elle peut être utile pour la prise en compte et la planification des coûts et des autres ressources. Mais la simulation 4D apporte une valeur ajoutée particulièrement intéressante par rapport aux autres méthodes de planification, dans la détection des risques (identification de chevauchements et de conflits, par exemple) et dans son aptitude à faciliter la communication. En effet, les modèles 4D sont utiles pour réaliser une revue virtuelle de la conception et une analyse des opérations de construction (Hartmann et *al.* 2008) de manière à identifier visuellement les conflits et les chevauchements, et planifier plus correctement l'ordonnancement des activités. Il s'agit de véritables outils de communication permettant aux différents acteurs du projet de discuter, de planifier et de coordonner l'avancement du projet (Dawood & Sikka 2007). L'étude réalisée par Mahalingam et *al.* (2010) montre que la CAO 4D peut être utilisée pour la planification, la conception et la construction, tout comme pour les fonctions

avancées de gestion de projet de construction. Ils mettent l'accent sur le fait que la simulation 4D est particulièrement utile :

- aux clients pour visualiser le processus de construction, le comprendre et s'y engager ;
- pour la visualisation de la revue de constructibilité ; et
- pour les réunions de revue de projet.

D'une manière générale, il est admis que l'impact est très significatif sur la réalisation du projet dans la mesure où elle permet d'augmenter la productivité, de réduire les interférences sur le chantier, en permettant notamment une meilleure analyse en phase pré-construction (Staub-French & Khazode 2007).

Mais pour être pleinement utiles, les modèles 4D doivent remplir un certain nombre de critères et permettre un certain niveau attendu d'interactivité, de représentation graphique, de détail du planning et d'aptitude dynamique. Ce niveau attendu diffère selon le besoin particulier des utilisateurs. Heesom et Mahdjoubi (Heesom & Mahdjoubi 2004) ont par exemple identifié 3 exigences fondamentales pour les applications 4D :

- la modélisation et la visualisation du produit ;
- la modélisation et l'analyse du processus ; et
- la collaboration et la communication.

Pour chacune de ces exigences, ils ont proposé les niveaux nécessaires d'interactivité, de représentation graphique, de détail du planning et d'aptitude dynamique (Tableau 4).

Tableau 4 : Exigences fondamentales pour les applications de simulation 4D [adapté de (Heesom & Mahdjoubi 2004)]

Application	Attributs			
	Niveau d'interactivité avec la simulation 4D	Niveau de représentation graphique	Niveau de détail du planning	Niveau d'aptitude dynamique de la simulation
Modélisation et visualisation du produit	Faible	Élevé	Faible	Faible
Modélisation et analyse du processus	Élevé	Faible	Élevé	Élevé
Collaboration et communication	Élevé	Faible	Élevé	Élevé/Faible

2.1.2 Les aspects de la construction pris en charge par la simulation 4D/nD

Une simulation 4D est un outil visuel très utile pour simuler la construction. Avec le développement de la technologie, il est possible de simuler de plus en plus d'aspects d'un projet de construction. Au nombre de ces aspects pris en compte par les outils 4D actuellement proposés, nous pouvons citer :

2.1.2.1 La communication des idées, la facilitation du travail collaboratif et l'éducation

Les modèles 4D sont particulièrement utiles pour permettre au client de visualiser et comprendre le processus de construction avant de s'engager. Ils peuvent également être très utiles dans le cadre de réunions de chantier ou de revue de projet pour discuter des prévisions, des alternatives et des niveaux d'exécutions réels en comparaison avec les prévisions. À cet effet, il faut noter, comme nous le dirons plus tard, que chacun des acteurs contribue à la collaboration par rapport à son rôle dans le projet. Ce qui veut dire que chacun des acteurs a des responsabilités spécifiques induisant un point de vue particulier sur le projet et des besoins d'information différents.

Par ailleurs, la simulation 4D/nD est de plus en plus utilisée dans le domaine de l'éducation, à cause de cette aptitude à faciliter la communication. Les formations en gestion des projets de construction sont très diversifiées en architecture, ingénierie et construction (Dietz & Litle 1976) et Clayton affirme que dans les cycles d'architecture, il est généralement établi que les étudiants n'assimilent pas beaucoup de connaissances pratiques sur les méthodes et la gestion de la construction (Clayton 2002). Clayton a ainsi présenté en 2002 une expérience d'utilisation de la construction virtuelle. Mais pour le cas d'environnements de construction plus complexes, il est important pour les étudiants de comprendre les difficultés liées à la planification et à la conduite de tels projets. L'introduction de la dimension temporelle semble donc nécessaire et la simulation 4D apparaît comme étant une solution évidente. Kang et *al.* (2004) ont réalisé une expérience d'enseignement de la planification à travers des modèles interactifs 4D de blocs de tour sur le web, montrant un bon intérêt de la visualisation 4D pour l'éducation. Sampaio et *al.* (2006) ont montré, avec différents exemples, que la réalité virtuelle et la simulation 4D peuvent être utiles pour l'enseignement de la mise en œuvre matérielle. Wang et *al.* (2007) ont quant à eux travaillé sur la valeur de l'utilisation de la simulation 4D dans l'enseignement de l'ingénierie. Plus récemment, une expérience d'enseignement de gestion de projet de construction par l'utilisation de modèles 4D a été menée à l'université de Liège et présentée par Kubicki et *al.* (Kubicki & Botton 2011; Kubicki et *al.* 2012).

2.1.2.2 la planification logistique, l'aménagement du chantier et les travaux d'excavation

Il s'agit ici d'un point important dans un projet de construction, car nous avons vu dans le chapitre précédent que la gestion de l'espace du chantier peut être un facteur de complexité du projet. Les modèles 4D peuvent aider à analyser plusieurs variantes de plans d'aménagement du chantier de manière à optimiser les espaces de stockage des matériaux, les voies d'accès pour les engins, le positionnement des grues et les flux des intervenants sur le chantier.

Les conflits spatio-temporels sont courants sur un chantier de construction. Ils peuvent concerner des éléments de l'ouvrage à construire qui se chevauchent ou se superposent, des acteurs intervenant sur le chantier en même temps et/ou au même endroit, des équipements heurtant d'autres équipements, des acteurs ou l'ouvrage en cours de réalisation. Dans le cadre de l'utilisation de la CAO 4D pour l'anticipation et la résolution de conflits spatio-temporels, Akinci et *al.* (2000) ont élaboré une taxonomie des conflits spatio-temporels (voir Tableau 5) pouvant se produire entre deux activités (Akinci et *al.* 2000).

Tableau 5 : Taxonomie des conflits spatio-temporels entre deux activités [adapté de (Akinci et al. 2000)]

		Activité 1					
		Composante d'ouvrage	Espace de travail	Espace d'équipement	Espace à risque	Espace protégé	Espace de structure temporaire
Activité 2	Composante d'ouvrage	Conflit de conception	Congestion	Congestion	Pas de conflit	Pas de conflit	Forte congestion
	Espace de travail		Congestion	Congestion	Risque lié à la sécurité	Dégât	Congestion
	Espace d'équipement			Forte congestion	Risque lié à la sécurité	Dégât	Congestion
	Espace à risque				Pas de conflit	Dégât	Pas de conflit
	Espace protégé					Pas de conflit	Dégât
	Espace de structure temporaire						Forte congestion

La CAO 4D peut également être un outil très intéressant pour la simulation des travaux d'excavation et de terrassement y compris les déblais et les remblais de terre (Yabuki & Shitani 2005). Les travaux de terrassement prennent beaucoup d'importance dans les projets de construction surtout dans le cas de projets routiers ou de constructions sur terrains accidentés. Shah et al. (Shah et al. 2008) ont d'ailleurs proposé une méthode de génération automatique de profils d'avancement pour les opérations de terrassement en utilisant des modèles 4D. En appliquant la méthode proposée au cas de projets routiers, ils concluent qu'une représentation graphique 4D des surfaces de profils simplifie l'interprétation des opérations de terrassement pour les planificateurs et permet de comparer l'avancement des terrassements en fonction des ensembles d'équipements, des conditions du chantier et des points d'accès au chantier.

2.1.2.3 l'analyse de constructibilité et des alternatives d'ordonnement des activités

Nous avons dit plus haut (voir paragraphe 1.2.1.1) que l'étude de constructibilité vise l'intégration optimale de la connaissance et de l'expérience de construction des différents acteurs, avec la conception technique pour atteindre les objectifs globaux du projet. Dans la pratique, il s'agit de mettre très tôt ensemble les professionnels expérimentés du projet pour étudier, à la lumière de leur expérience, la faisabilité des choix techniques et d'ordonnement. À cet effet, la simulation 4D peut être particulièrement utile pour simuler différentes alternatives. Sur la base d'un cas réel d'analyse de constructibilité réalisée à New York, Hartmann et Fischer (Hartmann & Fischer 2007) ont analysé comment des modèles 3D/4D peuvent être utiles comme support à la communication et à la génération de connaissances et de séquençages d'activités. À cet effet, ces auteurs montrent que les modèles 3D/4D sont utiles pour transférer divers types d'information tels que l'information de

conception, l'information de séquençage, l'information d'ordonnement. En effet, les modèles 3D/4D facilitent la compréhension de la conception en intégrant l'information qui généralement était distribuée à travers plusieurs plans 2D, et permettent de supporter le transfert de la connaissance détenue par plusieurs spécialistes différents. En ce qui concerne l'information de séquençage, les modèles 4D permettent l'animation des séquences de la construction qui peuvent être visualisées sous différents angles et points de vue et pour différentes périodes de temps. Ils aident ainsi au transfert de la connaissance de séquençage détenue par les gestionnaires de projet. Les modèles 4D rendent également possible l'animation pour des périodes de temps spécifiques de l'ordonnement qui peuvent également être visualisées selon différents angles et points de vue. Ceci permet de transférer la connaissance d'ordonnement détenue par les planificateurs. Il faut noter que certains acteurs importants (clients par exemple) d'un projet de construction ne sont pas forcément issus du secteur de la construction. Ils ont pourtant un besoin important de comprendre l'information qui leur est communiquée afin de prendre les meilleures décisions. Les modèles 3D/4D fournissent les informations de base pour réaliser une visualisation photoréaliste des activités du projet de construction pouvant être facilement compris par ce type d'acteur. La connaissance générée par l'équipe de projet durant le processus de planification peut ainsi être efficacement communiquée aux autres parties prenantes du projet. Sur la base de ces différentes observations, Hartmann et Fischer (2007) ont proposé un processus opérationnel (de type SADT) illustrant les fonctions spécifiques nécessaires à une analyse de constructibilité basée sur des modèles 3D/4D (Figure 31).

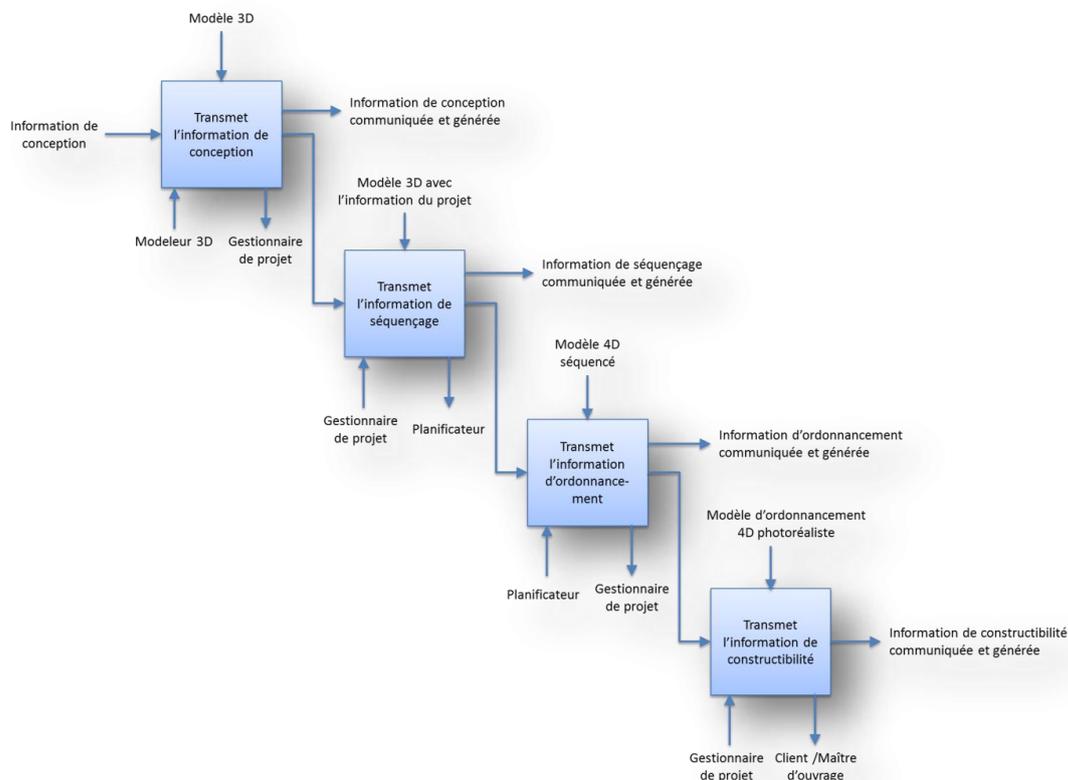


Figure 31 : Processus de communication et de génération d'information pour l'analyse de constructibilité basée sur des modèles 3D/4D [adapté de (Hartmann & Fischer 2007)]

2.1.3 Principaux outils logiciels et domaines d'application

La simulation 4D a connu un développement important ces dernières années. Ce développement s'est traduit par une diversification des outils logiciels de simulation 4D et des domaines d'application. Dans cette partie, nous proposons un aperçu de l'évolution des logiciels de simulation 4D et le développement de la simulation collaborative 4D/nD, notamment avec l'apport de la maquette numérique BIM.

2.1.3.1 Histoire des outils de simulation 4D de la construction

Selon Sheppard (Sheppard 2004), si les tentatives de modélisation en 4D ont démarré dans les années 1970, il a fallu attendre 1984 pour avoir la première solution logicielle commerciale de simulation visuelle de la construction. Il s'agissait de **PM-Vision** de la société *CSA (Construction Systems Associates)*. Deux ans plus tard, **Walkthru**, un outil 3D pour examiner la conception est proposé par *Bechtel* d'abord pour les stations de travail *Silicon Graphics* et ensuite pour les PC. En 1991, d'anciens employés de *Bechtel* créent la société *Jacobus Technology* (qui sera rachetée par Bentley en 1997) et mettent en place une interface entre **Walkthru** et les systèmes de CAO, avant de l'intégrer plus tard dans le logiciel de planification **Primavera P3**. L'amélioration de ce système, nommé **Construction Simulation Toolkit** par la société *Jacobus*, a permis la mise en place de **Navigator**, l'un des tout premiers systèmes de visualisation 3D en temps réel.

Alors que *Navigator* était en cours de développement, le *CIFE (Center for Integrated Facility Engineering)* de l'université de Stanford met en place **Visual 4D-CAD** pour simuler la réhabilitation du centre de santé du comté de San Mateo (Collier & M. Fischer 1995). **Visual 4D-CAD** n'était pas à proprement parler un nouvel outil, mais une utilisation complémentaire des outils existant à l'époque. La modélisation 3D par exemple avait été réalisée avec **AutoCAD** de la société *Autodesk* et l'animation avait été possible grâce aux capacités graphiques de l'*Indigo Elan* de *Silicon Graphics*. La société *Jacobus* avait également assisté le *CIFE* à travers **Walkthru** et le **Construction Simulation Toolkit** qui ont permis de créer le lien entre les plannings existants et les modèles 3D de San Mateo, pour réaliser l'animation. L'intérêt de **Visual 4D-CAD** résidait dans le fait qu'il s'agissait de la première application impliquant des installations non industrielles (Sheppard 2004). De plus, le caractère scientifique des travaux et la publication des résultats montraient l'intérêt, les limites et les enjeux scientifiques de la recherche sur la simulation 4D de la construction.

Toujours dans les années 1990, *Bentley Systems* proposait son **Schedule Simulator** et *Intergraph* son **Schedule Review**. Selon Sheppard, ces deux programmes avaient alors 2 limites majeures : un nouveau modèle 4D était nécessaire pour chaque nouvelle situation ou pour différents niveaux de détail, et il était impossible de faire des changements sur le modèle 4D et de mettre à jour simultanément le modèle 3D et le planning (Sheppard 2004). *Bentley* fusionne alors **Navigator** avec **Schedule Simulator**, de manière à simuler le processus de construction en intégrant des modèles 3D détaillés avec les informations cruciales de l'ordonnancement. Il était alors possible de générer facilement des simulations d'ordonnements de construction, de transports lourds, de manutention, de disposition d'équipement, et d'activités de maintenance, en permettant une compréhension claire des mouvements d'objets et des conflits et autres chevauchements dans la zone d'activité (Sheppard 2004). De son côté, *Intergraph* a proposé dans sa suite Plant Design System, **SmartPlant Review**, un outil de visualisation 3D dont le caractère modulaire permet

d'ajouter des fonctionnalités uniquement au besoin. Les modules concernaient pour l'essentiel la construction, les effets visuels, la collaboration et la génération de plan d'exécution.

2.1.3.2 Les principaux outils actuels

Dans les années 2000, plusieurs autres éditeurs ont fait leur apparition dans le monde de la CAO 4D. Plusieurs logiciels de plus en plus élaborés ont donc été proposés. Parmi eux, nous pouvons citer sans prétendre être exhaustif :

- **NavisWorks** (Autodesk) : La société *NavisWorks* a été créée en 2001 et basée dans la ville de Sheffield au Royaume-Uni. Spécialisée dans le développement et la commercialisation de logiciels 3D pour la coordination de la conception, détection des conflits et la simulation de la construction, elle a mis en service un module éponyme : *NavisWorks*. Le package est construit autour d'un module principal appelé **Roamer** qui associe plusieurs autres modules plug-in dont **TimeLiner** et **ClashDetective**, des solutions pour la 4D. L'avantage majeur de *Naviswork* résidait alors à deux niveaux : le fait de pouvoir récupérer des modèles 3D de différents formats propriétaires (.dwg, .dxf, .dgn, .dwf, etc.) et d'en faire un modèle unique dans la grande variété de modules efficaces complémentaires ; et la variété et la complémentarité de ses modules. Si les trois premières versions se sont appelées *NavisWorks* (1, 2 et 3), le package a ensuite changé de nom pour s'appeler **JetStream** pour les versions 4 et 5. En 2007, la société *Navisworks* a été rachetée par *Autodesk* pour faire de **JetStream** sa solution de simulation 4D. **JetStream** a alors été rebaptisé **NavisWorks**.



Figure 32 : Copie d'écran de l'interface de Navisworks [Source : asti.com]

- **Synchro Professional** (Synchro Ltd) : Synchro Ltd est une société anglaise dont le siège est à Birmingham. Depuis 2001, elle développe des solutions informatiques de gestion de la chaîne de production et de simulation de la construction. La solution de simulation

4D/nD qu'elle propose (dénommée *Synchro Professional*) est spécialisée dans la réalisation de modèles 4D et 5D (4D + coûts) au format IFC.



Figure 33 : Copie d'écran de l'interface de Synchro Professional [Source : synchro ltd.com]

- **Vico Control (Vico)** : **Vico Control** se démarque des autres logiciels de planification 4D par son utilisation d'une méthode de planification issue de l'association de la planification linéaire et du Last Planner (voir paragraphe 1.2.3.4). Vico Control propose par ailleurs une plateforme 5D permettant de visualiser à la fois la géométrie 3D de l'ouvrage, le budget et la planification des coûts.

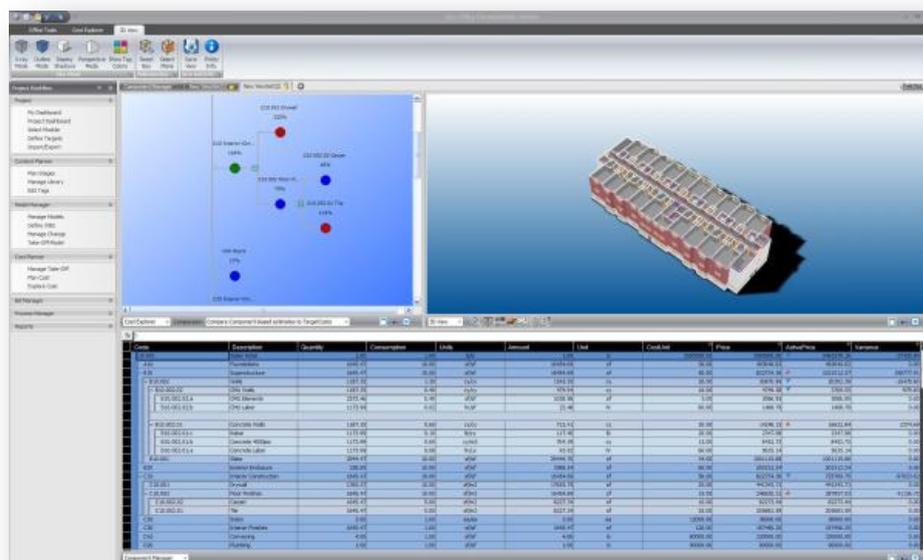


Figure 34 : Copie d'écran de l'interface de la plateforme 5D de Vico [Source : vicosoftware.com]

- **FourDviz** et **fourDspace** (Balfour Technologies) : Selon Sheppard (2004), la technologie **FourDviz** est née de la collaboration entre *Balfour Computer Systems* et *Infinity Technologies*. Il s'agissait alors d'un outil interne pour la production de livrables visuels 4D pour des contrats de consultation en transport, basé sur la technologie de simulation des vols. Les deux sociétés fusionnèrent en 1999 pour former *Balfour Technologies* qui vendit des licences de **FourDviz** à plusieurs clients dès son lancement en 2001. En 2003, *Balfour* lance **fourDspace** qui intègre un navigateur permettant à l'utilisateur d'intégrer et d'analyser visuellement des flux de données multidimensionnelles dans un environnement collaboratif. Les utilisateurs pouvaient ainsi manipuler des modèles 3D pilotés par des ensembles de données temporelles. Une fonctionnalité collaborative unique dans **fourDspace** résidait dans son aptitude à transférer une interface utilisateur **fourDspace** locale vers un utilisateur distant connecté au même portail 4D (Sheppard 2004). Les technologies proposées par *Balfour* sont généralement des applications Web qui n'ont pas besoin d'être installées localement.
- **xD Builder** (D-Studio) : La particularité de la suite xD Builder de la société belge D-Studio réside principalement dans le fait qu'elle repose en partie sur Sketchup (la solution gratuite de modélisation 3D initialement proposée par *Google* et reprise en 2012 par *Trimble*) tout en restant adaptable aux solutions de modélisation 3D existantes. Des éléments d'un modèle 3D Sketchup peuvent être reliés aux activités correspondantes (construction, déconstruction, etc.) via planning interne (réalisé avec le plug-in *xD Builder*) ou par importation d'un planning provenant de logiciels classiques de planification (**MS Project**, etc.).

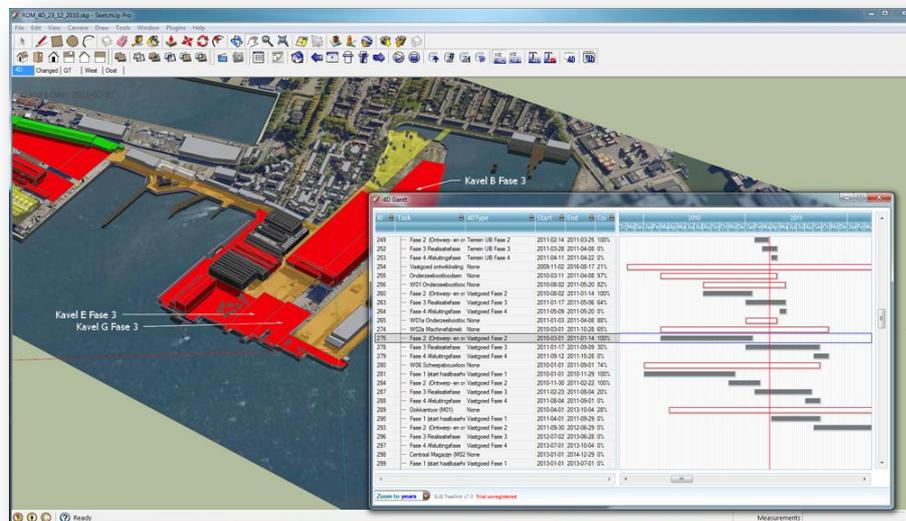


Figure 35 : Capture d'écran de l'interface SketchUp intégrant le plug-in xD Builder [Source : 4dvirtualbuilder.com]

- **Common Point** : **Common Point** est une solution 4D née d'une recherche conjointe entre *Walt Disney* et le *CIFE* (Stanford) vers la fin des années 1990. Elle s'intègre à différents environnements informatiques grâce à la mise en œuvre d'intergiciel³ dédiés. Elle donne

³ Un intergiciel est un logiciel tiers qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques. Le réseau est mis en œuvre par l'utilisation d'une même technique d'échange d'informations

ainsi la possibilité aux professionnels de la conception et de la construction de vérifier et de réorganiser le modèle 3D et l'ordonnancement des activités correspondantes à différents niveaux de détail et dans différents environnements informatiques intégrés (desktop, web, réalité virtuelle, etc.). **Common Point** a été utilisé pour la première fois pour la planification des séquences de construction de la Paradise Pier dans le cadre du projet California Adventure de *Disney* (Sheppard 2004). Depuis, il a été utilisé dans des projets de différents types et de tailles diverses, aussi bien professionnels qu'académiques.

2.1.3.3 L'essor du BIM et la simulation collaborative 4D/nD

Selon McKinney et *al.* (1996), si les outils de CAO 4D de la première génération n'étaient pas forcément collaboratifs, la génération suivante est caractérisée par son caractère interactif et collaboratif. D'ailleurs, plusieurs éditeurs de logiciels 4D font de la prise en charge de la collaboration un argument commercial important. Il convient de rappeler que le secteur de la construction se caractérise notamment par une multidisciplinarité due à l'implication de plusieurs spécialités avant et durant la réalisation du projet (voir paragraphe 1.1.2.3). Le fort besoin d'échange et d'interopérabilité entre les différents intervenants a conduit au BIM, maquette numérique au format IFC du bâtiment. Le format IFC, principal résultat de l'IAI (Alliance Internationale pour l'Interopérabilité), est un modèle de données pour l'industrie du bâtiment (partiellement standardisé ISO 16739). Il couvre diverses disciplines, notamment l'architecture, l'ingénierie, la construction et l'exploitation. Ce modèle de données peut-être partitionné et spécialisé en sous-ensembles, chacun considéré comme un *Model View Definition*, permettant de structurer les échanges de données à manipuler par différents utilisateurs impliqués dans un projet de construction (East & Chipman 2011).

Comme nous l'avons dit à la fin du paragraphe 2.1.1.3, la modélisation nD se sert généralement du BIM pour permettre l'utilisation d'un modèle 3D global intégrant des informations du bâtiment utilisables par la plupart des acteurs du projet, de manière interopérable. Mais le plus grand intérêt du BIM pour la simulation 4D/nD réside dans le support à la collaboration, et l'utilisation du BIM est très utile aux éditeurs de logiciels 4D/nD pour proposer des solutions de **simulation collaborative 4D/nD**. Il faut dire que l'intégration du BIM (de diverses manières) par les grands éditeurs de logiciels du secteur permet aux utilisateurs (intervenants d'un projet de construction) d'utiliser un modèle 3D unique pour la collaboration multidisciplinaire tout au long du cycle de vie du projet (Ku et *al.* 2008). À cet effet, Zhou et *al.* (2012) citent par exemple l'intégration par Autodesk de *worksets* dans Revit pour permettre à plusieurs personnes de travailler en même temps sur plusieurs parties d'un même projet ; l'utilisation par Bentley des *i-models* comme conteneurs pour un échange ouvert de l'information ; l'application par Tekla Structures du modèle *master/working* pour le contrôle du modèle dans ses applications serveur/client ; ou encore l'adoption par Gehry Technologies d'un système de contrôle de version nommé *Subversion* pour permettre aux participants de contrôler de manière indépendante leur opération de lecture/écriture sur les modèles du projet (Zhou et *al.* 2012).

dans toutes les applications impliquées à l'aide de composants logiciels (Source : Wikipédia, consulté le 26/08/2012).

Selon Zhang et *al.*, l'apport du BIM en matière de partage et d'échange d'information dans les systèmes de construction virtuelle tels que la simulation 4D/nD réside en cinq bénéfices potentiels (Zhang et al. 2012) :

- la possibilité d'adopter un modèle 3D issu du travail des architectes et des ingénieurs pour la simulation ;
- la possibilité de partager les informations relatives à l'ordonnancement et aux coûts générés dans les systèmes de planification et d'estimation des coûts, en les important via des fichiers IFC neutres ;
- la possibilité d'utiliser les informations réalistes des interfaces IFC des applications de conception pour réaliser un meilleur rendu dans les applications de construction virtuelle ;
- la possibilité d'améliorer énormément l'interopérabilité des différents systèmes de construction virtuelle ;
- la possibilité d'intégrer le modèle dans un BIM total comme partie intégrante de l'information de réalisation du projet une fois que ce dernier est terminé ; ce qui augmente l'intérêt du BIM dans la phase post-construction.

L'essor du BIM a donc techniquement contribué à celui des systèmes de simulation collaborative 4D/nD de la construction. Par ailleurs, plusieurs travaux scientifiques se sont intéressés, avant et après l'avènement du BIM, à différents aspects de la simulation collaborative 4D (Fischer et *al.* 2002; Waly & Thabet 2002; Hu & Zhang 2010; Zhou et *al.* 2012; Zhou et al. 2009). Nous reviendrons en détail sur certains de ces travaux dans le paragraphe 5.1.3.3 dans la partie de notre proposition que nous consacrons à la conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction.

Il est important de noter que la visualisation est un point crucial de la simulation 4D/nD de la construction. Et, qu'en fonction des différents rôles joués par les participants à un projet de construction, ils n'ont pas les mêmes besoins en ce qui concerne la visualisation en matière de planification (voir paragraphes 1.2.2.1 et 1.2.2.3). Cette remarque cruciale sera au cœur de notre problématique de recherche, que nous présentons dans la suite.

◆ **Retenons, avant d'aller plus loin :**

- 1) La CAO 4D apporte une dimension spatiale à la planification de la construction et permet de simuler la construction des ouvrages à travers le temps.
- 2) La simulation 4D est utilisée dans plusieurs domaines de la construction et l'ajout de nouvelles dimensions, liées notamment aux coûts et aux autres ressources des ouvrages, permet de passer de la 4D à la nD.
- 3) Les nouvelles générations d'outils de simulation 4D/nD mettent l'accent sur l'aspect collaboratif de la simulation et l'essor du BIM encourage la simulation collaborative 4D/nD de la construction.
- 4) Les outils existants proposent généralement la même vue standard (3D + diagramme de Gantt) à tous.

2.2 Problématique, travaux similaires et approche de recherche

2.2.1 Besoin d'adaptation de la visualisation dans la simulation collaborative 4D/nD de la construction

Nous avons compris qu'un intérêt important de la simulation 4D/nD réside dans son apport visuel, mais également sa capacité à faciliter la communication et la collaboration. Nous présentons ici la problématique liée à l'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD. Nous évoquons notamment le lien étroit entre la simulation 4D/nD et la visualisation, l'utilisation des « vues métiers » dans le secteur de la construction et le besoin de construire les simulations 4D/nD sur la base des vues métiers correspondant aux besoins réels des utilisateurs.

2.2.1.1 Simulation 4D et visualisation

La plupart des solutions commerciales de simulation 4D/nD proposent des « vues classiques » (3D + Gantt), se concentrent beaucoup sur le caractère esthétique de la visualisation et très peu d'entre elles offrent la possibilité de réaliser sur la simulation des tâches analytiques adaptées aux besoins spécifiques de chaque utilisateur (Heesom & Mahdjoubi 2004). Or, le véritable intérêt de la simulation 4D réside non pas dans son esthétique, mais bien dans la compréhension spatiale et intuitive qu'elle offre aux professionnels afin d'analyser des alternatives, identifier des conflits et communiquer. La visualisation est donc essentielle dans le processus de simulation et il est primordial d'utiliser les modes de représentation les plus appropriés. Selon Kuljis et Paul (Kuljis & Paul 2001), si des représentations inappropriées sont utilisées :

- l'utilisateur pourrait être obligé de trop utiliser sa mémoire pour effectuer la traduction constante entre les objets affichés et ce que ces objets sont censés représenter dans la réalité ;
- les concepts utilisés pourraient ne pas avoir une association étroite et naturelle avec le problème à résoudre ;
- les tâches à réaliser durant le processus de modélisation pourraient ne pas être appropriées au problème posé.

Plusieurs méthodes et modes de représentation existent pour la planification de la construction (voir paragraphe 1.2.2.3). Chaque mode de représentation correspond à un besoin particulier de visualisation, donc à une vue métier différente. Cette notion de « vue métier » nous semble essentielle pour comprendre les pratiques de visualisation dans le secteur. Aussi convient-il de la définir avant d'avancer dans l'énoncé de la problématique.

2.2.1.2 Les vues métiers

La visualisation est une activité cognitive facilitée par des représentations visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation mentale du monde. Partant de cette définition et conformément à nos besoins spécifiques dans le cadre de la présente thèse, nous allons considérer les vues comme étant ces représentations visuelles externes. Il s'agit donc de ce que l'on voit, fruit d'un processus de mappage des structures de données à des structures visuelles (Mazza

2009). Dans le cas de l'utilisation d'un outil informatique, il s'agira de la fenêtre affichant à l'écran tout ou partie d'un programme. On parle alors de « vue utilisateur ».

Kubicki et *al.* (2007) définissent les vues métiers comme étant les vues que les professionnels du secteur manipulent dans leur travail de tous les jours. Que ce soit par l'intermédiaire de supports papiers ou numériques, ces professionnels sont habitués à faire appel à des techniques de représentation qui leur permettent de répondre au mieux à leur besoin de visualisation. Dans le secteur de la construction par exemple, il est très courant d'avoir recours à un diagramme de Gantt pour représenter le planning ou à un réseau PERT pour mettre en évidence le chemin critique. La particularité d'une vue métier, par rapport à tout autre type de vue, réside dans le lien intrinsèque que la représentation entretient avec le métier de son utilisateur. Il s'agit donc, dans la plupart des cas, de techniques de représentation liées à des besoins particuliers liés au métier de son utilisateur, et véhiculant des informations très précises. Nous avons vu plus haut (voir paragraphe 1.2.2.3) les différents modes de représentation du planning et noté comment chacun d'entre eux répond à un besoin précis des professionnels et surtout comment ils assistent une méthode de planification particulière. Ceci, bien sûr, ne s'applique pas à toutes les catégories de vue. Le diagramme de type « Camembert » par exemple ne peut pas être considéré comme étant une vue métier. En effet, s'il est vrai qu'un diagramme de type « Camembert » répond à un besoin de visualisation, ce besoin n'est pas forcément lié à une catégorie de professionnels ou à un domaine particulier.

2.2.1.3 Hypothèse et objectifs de la thèse

La planification de la construction est une activité largement collaborative. Pourtant, l'usage collaboratif de la simulation 4D reste limité, notamment à cause du manque d'adaptation des vues manipulées. En effet, la plupart des outils 4D actuels, même s'ils proposent la simulation collaborative comme un argument commercial, se contentent de proposer les mêmes vues « standards » à tous les acteurs. Pourtant les méthodes de travail traditionnelles dans le secteur s'appuient sur différentes représentations visuelles que les professionnels ont l'habitude de choisir en fonction de leurs besoins particuliers.

Nous formulons l'hypothèse que les vues proposées dans les outils de simulation collaborative 4D/nD devraient être adaptées aux besoins de chacun des acteurs impliqués dans une simulation collaborative. Une telle adaptation devrait se baser sur le choix de vues métiers correspondant aux besoins réels de chacun, une bonne coordination de ces vues métiers, et l'utilisation de mécanismes d'interactions appropriés.

L'objectif de la thèse est de proposer une méthode permettant de proposer des vues adaptées aux besoins de chacun des acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D/nD de la construction. Il ne s'agit pas ici de générer automatiquement des vues, mais plutôt d'assister les concepteurs de solutions de simulation collaborative 4D/nD dans le choix des visualisations adaptées et dans la conception d'interfaces appropriées pour chaque acteur. Ceci revient à identifier les besoins des différents acteurs, de les transformer en des besoins de visualisation et de choisir les vues métiers et les mécanismes appropriés pour leur coordination.

Le public ciblé par la méthode à proposer se compose de deux types de bénéficiaires :

- les éditeurs de collecticiels de simulation collaborative 4D/nD de la construction qui sont les cibles directes de la méthode. En effet, elle devrait leur permettre de tenir compte des besoins réels des utilisateurs finaux des solutions informatiques afin de concevoir de choisir les vues les plus adaptées.
- les utilisateurs finaux, c'est-à-dire les professionnels et autres experts métiers du secteur de la construction, sont également des bénéficiaires potentiels d'une telle méthode. En effet, la prise en compte de leurs besoins réels par les outils de simulation 4D/nD devrait permettre des gains en qualité, en réduction des délais et en économie de ressources.

◆ Retenons, avant d'aller plus loin :

- 1) Les outils de simulation collaborative 4D/nD proposent une vue classique (4D+Gantt) à tous les utilisateurs.
- 2) Traditionnellement, plusieurs « vues métiers » existent dans le secteur et les professionnels choisissent l'une ou l'autre d'entre elles en fonction des besoins spécifiques liés à leur rôle.
- 3) Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible, dans le cadre d'une simulation collaborative 4D/nD, de proposer à chaque acteur une visualisation adaptée construite à partir des vues métiers les plus appropriées à son rôle.
- 4) Notre objectif est de proposer une méthode pouvant assister les concepteurs d'outils de simulation collaborative 4D/nD dans la conception de vues utilisateurs adaptées aux besoins métiers des utilisateurs.

2.2.2 Quelques travaux de recherche similaires

2.2.2.1 Conception de représentations 4D en utilisant des techniques de visualisation de l'information

En 1999, Liston et *al.* posent le problème de l'inexistence de représentation visuelle qui permettrait aux planificateurs de la construction de communiquer toute l'information nécessaire et d'évaluer la planification (Liston 1999). Ils définissent alors trois aspects pour la conception de représentations 4D à savoir : définir les interactions entre les éléments de la représentation 4D, et entre le contenu 4D et les utilisateurs ; étendre la représentation classique du contenu du planning afin de générer des représentations 4D ; et spécifier et appliquer des critères de performance pour évaluer des alternatives de représentations 4D. En partant du fait que traditionnellement les planificateurs génèrent des plannings pour représenter le processus de construction comme un ensemble de tâches et pour évaluer des contenus existant dans une variété de formes et de supports. Ces contenus sont relatifs à l'organisation spatiale du chantier, à la disponibilité des ressources, aux informations pour les commandes de composants, et aux contraintes budgétaires. Si les avancées technologiques permettaient à cette époque l'utilisation de visualisations 4D pour communiquer sur

les aspects spatiaux, certains contenus liés à des besoins de planification n'étaient pas suffisamment couverts. Ils classifient les contenus en 3 catégories :

- les contenus descriptifs, liés à la description du processus, tels que les espaces de travail, les zones de construction, et la disposition des équipements ;
- les contenus explicatifs, liés à la logique de l'ordonnement (par exemple, la raison pour laquelle une activité précède une autre) ; et
- les contenus prédictifs, liés au comportement d'une séquence spécifique, tels que le coût, le temps ou la productivité.

Un constat important justifiait leur problématique : les théories sur la conception d'Interfaces Homme-Machine (IHM) n'étaient pas utilisées dans la conception des outils de planification du secteur de la construction. Leur objectif était donc de briser cette tendance et d'utiliser les théories de visualisation de l'information pour concevoir et évaluer des représentations 4D interactifs. Ils s'intéressaient plus précisément à l'interaction (quelles sont les interactions générales entre les éléments d'une représentation 4D et entre les contenus et les utilisateurs ?), à la représentation (comment étendre la représentation actuelle du contenu de planification pour générer des représentations 4D ?) et à l'évaluation (quels sont les critères d'évaluation et comment peuvent-ils être appliqués ?).

Des éléments de réponse à ces questions de recherche sont fournis en 2000 (Liston & Fischer 2000). Deux différentes techniques de visualisation (la surbrillance et la superposition) sont prototypées, évaluées et brevetées. La surbrillance est ici définie comme étant le processus de mise en lumière, à travers une annotation visuelle, d'ensembles liés d'information dans une vue ou à travers de multiples vues (Figure 36). Quatre types de surbrillance ont été prévus :

- la sélection d'un objet (élément de l'ouvrage, activité de construction, ressource, etc.) entraîne la mise en surbrillance de toutes les informations du projet qui lui sont liées ;
- la sélection d'une région spatiale entraîne la mise en surbrillance de l'information du projet liée à cette région ;
- la sélection d'une région temporelle (laps de temps) entraîne la mise en surbrillance de l'information du projet lié à cette région temporelle ;
- la sélection d'un objet (élément de l'ouvrage) entraîne un filtrage par surbrillance (par exemple, le choix de mettre en surbrillance uniquement un type spécifique d'information du projet).

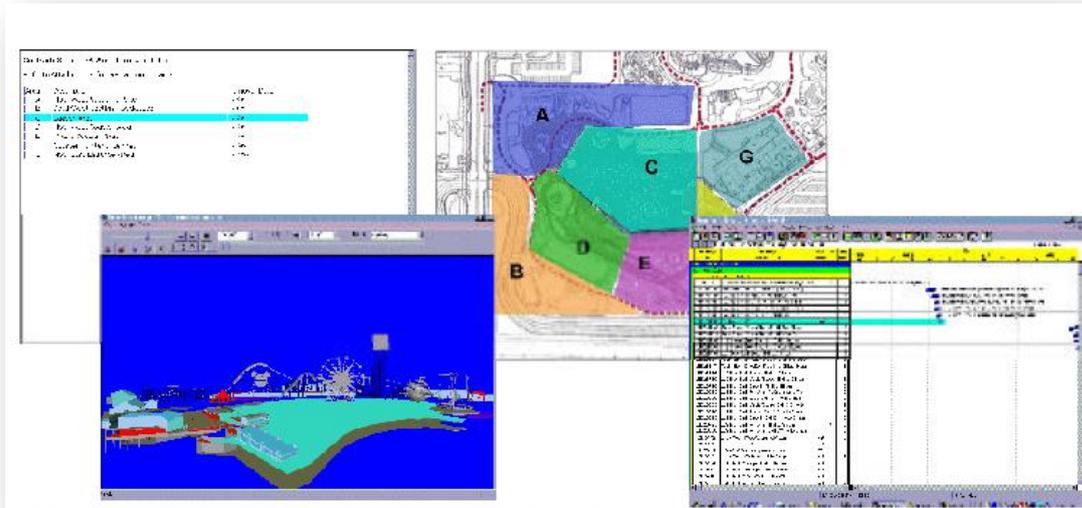


Figure 36 : Exemple d'utilisation de la surbrillance pour répondre à la question « quand accéder à la zone C ? » (Liston & Fischer 2000)

La superposition consiste à placer un ensemble d'informations sur un autre ensemble d'informations, ce qui donne une vue « fusionnée » (Figure 37). Le prototype proposé utilise quatre types de superposition :

- de document vers document de même type : par exemple, un diagramme de Gantt sur un autre diagramme de Gantt ;
- d'objet(s) vers document de même type : par exemple, placer un ensemble d'activités d'un diagramme de Gantt sur un autre diagramme de Gantt ;
- de document vers document de type différent : par exemple, placer modèle 3D sur un diagramme de Gantt ;
- d'objet(s) vers document de type différent : par exemple, placer un élément d'ouvrage sur un diagramme de Gantt.

Ces travaux de recherche se rapprochent de notre problématique de recherche dans le sens où ils essaient d'améliorer la perception des utilisateurs dans le cadre de la simulation 4D/nD. Par contre, la dimension collaborative n'est pas vraiment traitée et la compréhension des besoins de visualisation des utilisateurs n'est pas formalisée.

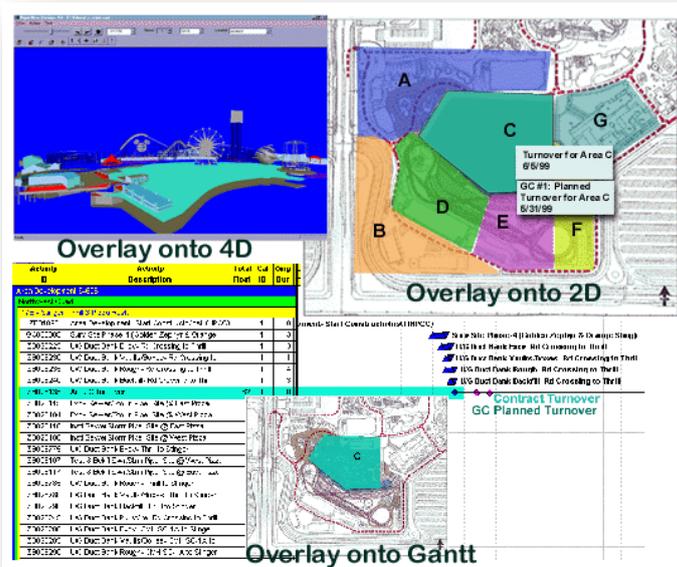


Figure 37 : Exemple de superpositions pour répondre à la question « quand accéder à la zone C » (Liston & Fischer 2000)

2.2.2.2 Nouvelle conceptualisation 4D=2D+Temps

Rischmoller et Valle (Rischmoller & Valle 2005) partent du constat que certains aspects de la construction demeurent généralement cachés lorsque l'on utilise l'approche traditionnelle considérant la 4D comme étant la combinaison d'un modèle 3D et du planning. Ils émettent donc l'hypothèse qu'un modèle 3D n'est pas une exigence obligatoire dans la construction d'un système de CAO 4D, et proposent une nouvelle conceptualisation de la 4D. Cette conceptualisation utilise des tableaux digitaux 2D capables d'afficher de façon dynamique sous forme de lignes et de colonnes arrangées dans une disposition spéciale, les dates de démarrage et de fin des tâches des sous-traitants reliées à la quatrième dimension (le temps) provenant de la planification.

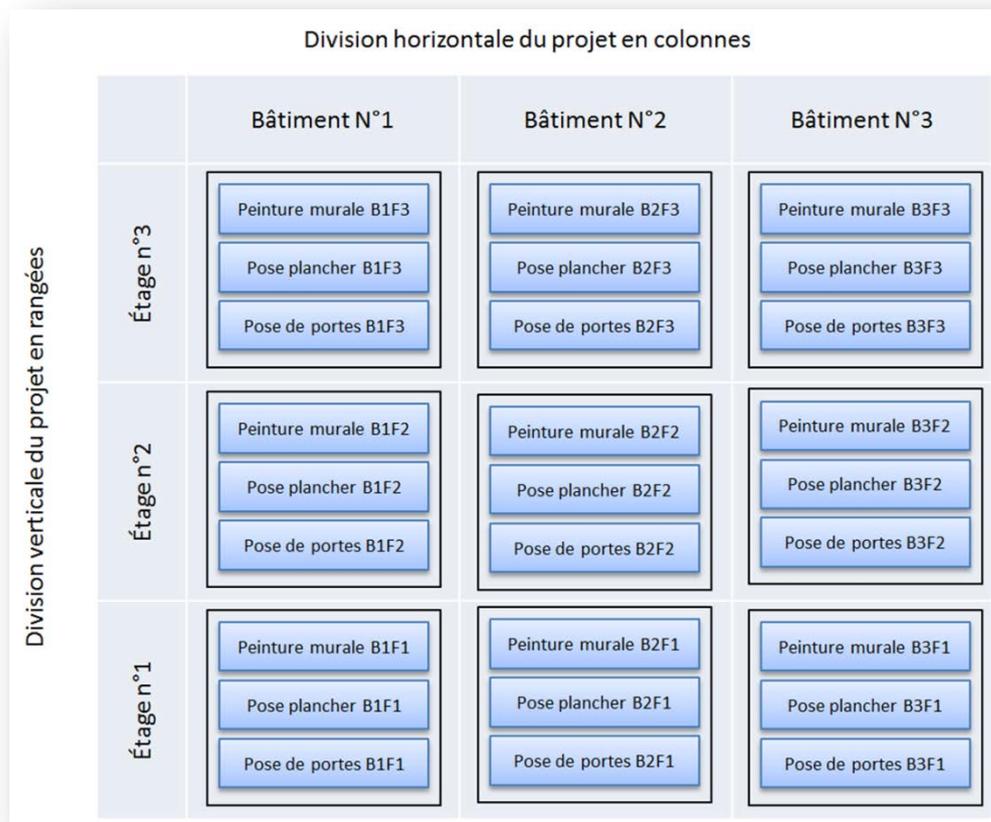


Figure 38 : Esquisse d'une partie du tableau digital de planification (Rischmoller & Valle 2005)

Ils ont créé des prototypes qu'ils ont utilisés, à des fins de validation, dans deux cas d'étude. Le tableau digital proposé fournit différentes façons d'afficher, de communiquer l'information relative aux ressources, aux coûts, aux dates et les relations provenant d'une planification traditionnelle basée sur la méthode du chemin critique (CPM).

Le lien de cette recherche avec notre problématique réside dans le fait qu'en fonction de l'usage et des besoins des différents acteurs, le modèle 4D peut être visualisé de différentes manières. Ainsi, l'association classique (3D + diagramme de Gantt) utilisée dans les outils actuels de simulation 4D pourrait être remplacée par d'autres modes de représentation pour mieux répondre à certains besoins des utilisateurs. Il faut noter que ces travaux ne vont pas plus loin et se contentent de répondre à un besoin de visualisation particulier, sans proposer un formalisme global de compréhension des besoins de visualisation des professionnels.

2.2.2.3 Utilisation de méthodes de planification linéaire dans la simulation 4D

Plus récemment, Russell et *al.* (2009) ont proposé un environnement de visualisation dynamique liant un modèle 3D et la planification linéaire pour créer des images 4D personnalisées. Leur proposition est partie du fait que les équipes de projet font face à des pressions croissantes pour réaliser le projet aussi vite que possible et que différentes représentations visuelles de la planification avec différentes informations associées peuvent aider à l'identification des meilleures stratégies de construction. Ces stratégies doivent permettre de raccourcir la durée du projet, évaluer

sa faisabilité et juger de la qualité de la planification. Par ailleurs, les méthodes de planification linéaire semblent tout à fait indiquées pour la planification de la construction des gratte-ciel mettant en œuvre des étages identiques et répétitifs.

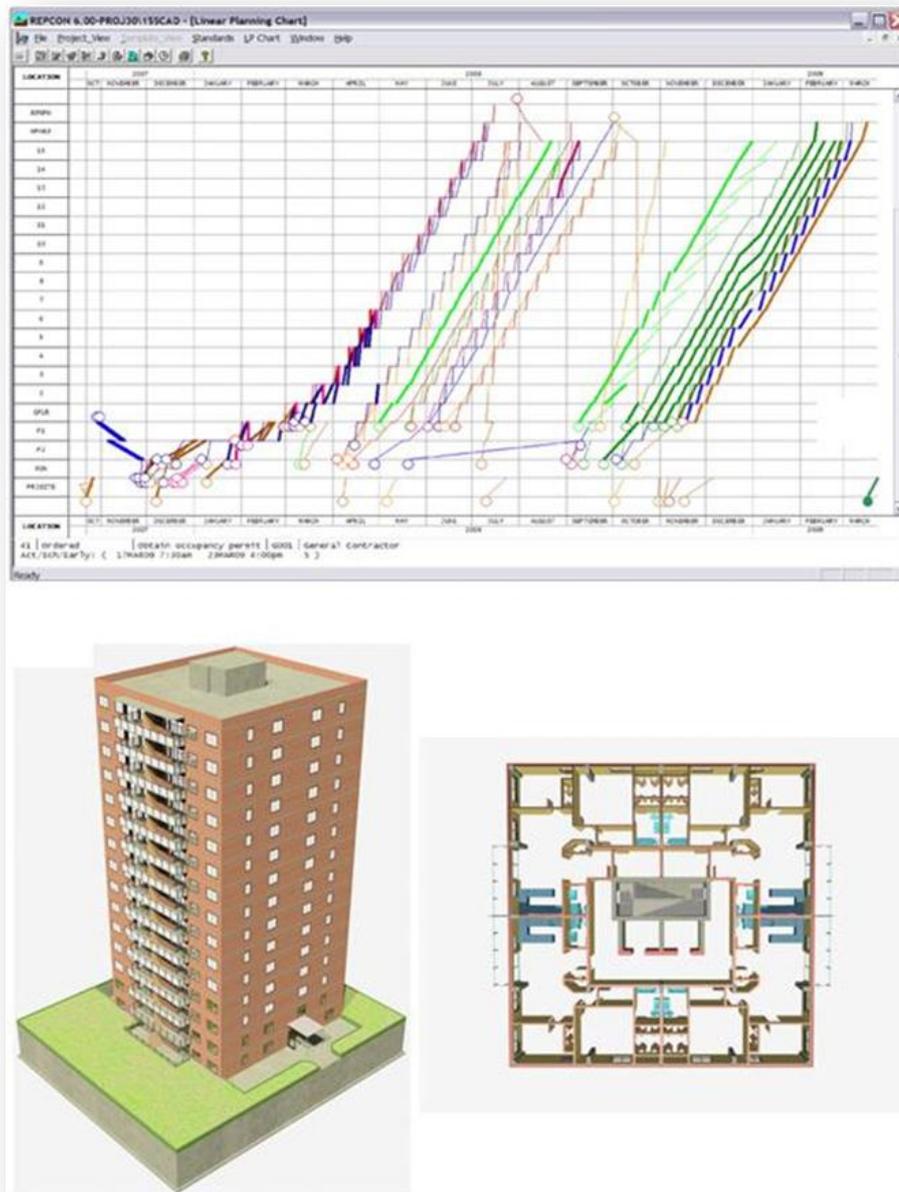


Figure 39 : Utilisation de la planification linéaire dans une simulation 4D [adapté de (Russell et al. 2009)]

Il est intéressant de noter à travers cette recherche qu'en dehors du Gantt, il est possible d'associer une représentation linéaire à un modèle 3D pour réaliser une simulation 4D de la construction. Néanmoins, cette recherche se limite à la planification linéaire et ne propose pas de méthode globale permettant de lier des besoins des acteurs à des modes de représentation appropriés, dans le cadre d'une simulation 4D/nD. Ainsi, les besoins des acteurs ne sont pas étudiés de manière plus globale et structurée.

2.2.3 Méthodes d'ingénierie des IHMs pour la conception d'interfaces adaptées

Nous allons, en rapport avec notre problématique, explorer ici les critères généralement utilisés pour la conception d'interfaces dans les collecticiels et quelques méthodes utilisées en IHM pour concevoir des interfaces adaptées aux utilisateurs.

2.2.3.1 Critères existants pour la conception d'interfaces dans les collecticiels

Il est plus difficile de gérer l'interaction homme-machine (IHM) dans les collecticiels que dans les applications mono-utilisateurs. Selon Otmane (Otmane 2009), cela est dû au fait que la conception des collecticiels demande, en plus des besoins de production :

- un enrichissement prenant en compte les dimensions de l'activité collective que sont la communication et la coordination ;
- la prise en compte d'éventuelles surcharges cognitives liées à une collaboration à distance ;
- la prise en compte de besoins d'adaptations aux individus ;
- la maîtrise par les utilisateurs des informations qu'ils transmettent.

Il s'agit donc de prendre en compte les différents espaces de la classification fonctionnelle des collecticiels (communication, production, coordination) afin de concevoir une interface multi-utilisateurs rendant effectivement compte de l'activité collective. Selon Otmane (Otmane 2009), les critères généralement considérés sont :

- le WYSIWIS (What You See Is What I See) : ce principe se réfère au paradigme selon lequel les utilisateurs interagissant avec un système logiciel multi-utilisateur partagent la même perception de l'espace du travail. Il existe le WYSIWIS strict et le WYSIWIS relaxé : le WYSIWIS strict fournit la même vue à tous les utilisateurs tandis que le WYSIWIS relaxé considère un espace d'affichage avec des vues privées et des vues publiques.
- la rétroaction de groupe et la conscience de groupe (*awareness*) : il est important de permettre aux différents utilisateurs d'être informés de la présence et de ce que font les autres de manière à mieux percevoir le contexte de leurs activités. Le retour d'information se faisant sous des formes textuelle, sonore, graphique, etc.
- le contrôle et le partage des données : il s'agit de gérer l'utilisation des ressources communes afin d'éviter les éventuels conflits lors d'accès concurrents. Ceci implique un contrôle des droits d'accès incluant un contrôle de la concurrence et un contrôle de cohérence des données.

L'adaptation de la visualisation ne figure pas parmi ces critères et le WYSIWIS, principe le plus communément adopté, suppose une même visualisation par tous de l'espace de travail. Même si ce principe est très intéressant, il ne correspond pas au besoin d'adaptation de la visualisation que nous envisageons dans le cas de la simulation collaborative 4D/nD de la construction. Nous allons voir dans le paragraphe suivant si les méthodes de conception centrée utilisateur y correspondent mieux.

2.2.3.2 Les méthodes de conception centrée utilisateur

Les méthodes de conception centrée utilisateur placent l'utilisateur au centre du processus de conception d'interface homme-machine, de manière à s'assurer qu'il pourra faire une utilisation du produit de la manière prévue, avec un minimum d'effort d'apprentissage. Ces méthodes proviennent des recommandations de Norman (Norman 2002) pour intégrer l'utilisabilité dans la conception. Ces recommandations sont :

- faire en sorte qu'il soit à tout moment facile de déterminer quelles actions sont possibles ;
- rendre les choses perceptibles, y compris le modèle conceptuel du système, les actions alternatives, et les résultats des actions ;
- faire en sorte qu'il soit facile d'évaluer l'état actuel du système ;
- suivre les correspondances naturelles entre les intentions et les actions nécessaires, entre les actions et les effets résultants, et entre l'information visible et l'interprétation de l'état du système.

Sur la base de ces recommandations, plusieurs principes ont vu le jour pour assister les concepteurs. Dans la pratique, l'implication des utilisateurs se fait par des techniques permettant de rassembler de l'information sur les besoins et les attentes des utilisateurs à différents moments de la conception. Dans le tableau suivant (Tableau 6), Preece et *al.* (2002) proposent une classification de ces techniques avec leur but principal et l'étape où elles interviennent dans la conception.

Tableau 6 : Techniques d'implication de l'utilisateur dans la conception [adapté de (Preece et al. 2002)]

Technique	But	Étape du cycle de conception
Interviews de fond et questionnaires	Collecte de données relatives aux besoins et attentes des utilisateurs ; évaluation des alternatives de conception, des prototypes et de l'artéfact final	Au début du projet de conception
Séquences d'interviews au travail et questionnaires	Collecte de données relatives à la séquence de travail à réaliser avec l'artéfact	Tôt dans le cycle de conception
Focus groups	Intégration d'un large éventail de parties prenantes pour discuter des enjeux et des besoins	Tôt dans le cycle de conception
Observation sur le terrain	Collecte d'informations concernant l'environnement dans lequel l'artéfact est utilisé	Tôt dans le cycle de conception
Jeux de rôle, tests, et simulations	Évaluation des conceptions alternatives et obtention des informations supplémentaires sur les besoins et attentes des utilisateurs ; évaluation du prototype	Tôt et à mi-parcours dans le cycle de conception
Tests d'utilisabilité	Collecte de données quantitatives relatives à des critères mesurables d'utilisabilité	Étape finale du cycle de conception
Interviews et questionnaires	Collecte de données qualitatives relatives à la satisfaction de l'utilisateur à propos de l'artéfact	Étape finale du cycle de conception

Trois propriétés sont généralement utilisées pour adapter les interfaces en IHM. Il s'agit de l'adaptabilité, de l'adaptativité et de la plasticité. Thevenin et al. (1999) définissent ces trois propriétés comme suit :

- adaptabilité : « capacité d'une interface à être modifiée par l'utilisateur » ;
- adaptativité : capacité d'une interface à « se modifier sans intervention explicite » de l'utilisateur ;
- plasticité : capacité d'une interface à « s'adapter aux contraintes matérielles et environnementales dans le respect de son utilisabilité ».

Comme on le voit, ces propriétés se rapportent à des aspects de l'adaptation qui n'insistent pas suffisamment sur la description des besoins liés au métier des utilisateurs. Or, une telle description est problématique dans le secteur de la construction, car le contexte de collaboration y est toujours différent d'un projet à l'autre et les acteurs n'y jouent pas toujours le même rôle. Les approches classiques existant dans le domaine des IHM ne sont que très peu (ou pas) efficaces à cet effet. Notre méthode devra mettre un accent particulier sur cette description de la situation collaborative dans les projets de construction, de manière à faire ressortir les besoins de chaque acteur.

2.2.3.3 Les méthodes centrées usage

Les méthodes centrées usage partent du principe qu'en se focalisant sur l'usage et les buts de l'utilisation de l'outil (logiciel), il est possible pour les développeurs de mieux comprendre le monde réel des utilisateurs finaux et concevoir des systèmes plus simples correspondant mieux au travail de ces utilisateurs (Constantine 1996). Le qualificatif « centré usage » se justifie donc par le fait que

l'attention est portée sur l'utilisation dont le logiciel doit faire l'objet en tant que support à une activité. La compréhension de l'utilisation découle de modèles d'usage décrivant cette activité, des effets que le contexte opérationnel et l'expérience des utilisateurs ont sur ces modèles.

L'essence de l'ingénierie logicielle centrée usage est donc la compréhension de la structure de l'activité à supporter, et la mise en correspondance de l'interface utilisateur avec la structure de cette activité. À cet effet, les développeurs ont besoin de bons outils conceptuels pour les aider à prendre des décisions. Pour ce faire, il est possible d'utiliser un ensemble de modèles reliés entre eux, pour :

- modéliser l'activité des utilisateurs, et
- modéliser la conception de l'architecture d'interface utilisateur correspondante.

L'approche centrée usage est plus proche de nos questionnements en ce sens qu'elle met l'accent sur les pratiques des utilisateurs qu'elle cherche à comprendre et à modéliser. Mais par rapport à notre problématique, nous émettons deux réserves majeures à l'égard de ces méthodes. La première concerne la place assez faible qu'occupent les préoccupations relatives à la visualisation dans l'application de ces méthodes, et dans les modèles qui les soutiennent. Ensuite, ces méthodes, de notre point de vue, confondent tout à fait le contexte de l'activité avec le contexte utilisateur. Si dans certains domaines (l'informatique, par exemple), ces deux contextes peuvent bien se confondre, ce n'est pas le cas pour des secteurs complexes et assez peu perméables aux outils informatiques, comme c'est le cas dans la construction.

2.2.3.4 Les assistants de visualisation

Parmi les travaux sur les assistants de visualisation (Mackinlay 1986, Lange et al. 1995, Healey et al. 2008), nous présentons ici ViA qui est l'un des systèmes les plus récents et assez représentatifs de cette tendance. Healey et al. (2008) présentent ViA comme étant un système collaborant avec les utilisateurs pour identifier, d'un point de vue perceptuel, les techniques de visualisation les plus efficaces pour les ensembles de données larges et multidimensionnels. Il s'agit notamment d'évaluer l'efficacité d'une technique de visualisation pour un ensemble de données et de tâches analytiques données, et de diriger rapidement sa recherche vers de nouvelles techniques de visualisation les plus à même d'apporter des améliorations au-delà de celles jusque-là utilisées (Healey et al. 2008).

Healey et al. (2008) précisent que le contexte, l'expertise domaine et une compréhension haut-niveau des ensembles de données sont cruciaux pour l'identification de techniques de visualisation efficaces. L'un des principaux buts affichés étant de donner la possibilité aux utilisateurs de construire des visualisations pour leurs données, un certain nombre d'exigences ont été formulées concernant le système, son utilisation et les visualisations résultant de son utilisation. Ces exigences concernent l'efficacité (par rapport aux tâches analytiques), la multidimensionnalité, la transparence (les utilisateurs doivent pouvoir comprendre et guider l'assistant, définir des préférences, etc.), la neutralité (vis-à-vis de l'application) et l'extensibilité (pouvoir s'étendre pour s'adapter à de nouvelles visualisations découvertes).

La problématique traitée par les assistants de visualisation est très proche de la nôtre dans la mesure où elle concerne le choix de techniques de visualisation adaptées. Les exigences formulées nous semblent donc tout à fait applicables pour notre besoin. Mais le champ d'application est très

différent, ce qui fait que les données à visualiser ne sont pas de même type. Si, dans le cas des assistants visuels, il s'agit généralement de données numériques multidimensionnelles, les données à visualiser dans le cadre d'une simulation 4D/nD sont de natures variées en ce sens qu'elles peuvent concerner à la fois la représentation de l'ouvrage, la planification dans le temps, les ressources, etc. De plus, l'existence et l'utilisation de vues métiers dans le secteur est un aspect capital à prendre en compte dans notre approche.

2.2.4 Une approche inspirée des méthodes de la science de la conception

2.2.4.1 La science de la conception (design science)

Dans la discipline des systèmes d'informations, la plupart des recherches se caractérisent par deux principaux paradigmes : la science comportementale et la science de la conception (Hevner et al. 2004). La science comportementale vise le développement et la vérification de théories expliquant ou prédisant les comportements humains ou organisationnels. La science de la conception, quant à elle, cherche à étendre les limites des capacités humaines ou organisationnelles par la création d'artefacts nouveaux et innovants. Selon Hevner (2004), dans le paradigme de la science de la conception, la connaissance et la compréhension d'un domaine de problème et sa solution sont réalisées en construisant et en appliquant l'artefact conçu. Il s'agit donc de concevoir des artefacts pour atteindre des buts, de créer des choses pour servir des usages humains, en restant orienté technologie (March & Smith 1995). Pour March et Smith (1995), les produits de la science de la conception sont de quatre types (les constructions [*constructs*], les modèles, les méthodes, et les instanciations) et il y a un réel besoin de langage de base de concepts (les constructions) pour caractériser les phénomènes.

Hevner (2004) propose sept directives pour assister les chercheurs dans la compréhension des exigences pour une recherche réussie en science de la conception. Ces directives sont les suivantes :

- Directive 1 : la recherche en science de la conception doit produire un artefact viable sous la forme d'une construction, un modèle, une méthode, ou une instanciation.
- Directive 2 : l'objectif de la recherche en science de la conception est de développer des solutions basées sur la technologie pour résoudre des problèmes métiers importants et pertinents.
- Directive 3 : l'utilité, la qualité, et l'efficacité d'un artefact de conception doivent être rigoureusement démontrées par des méthodes d'évaluation bien exécutées.
- Directive 4 : une recherche efficace en science de la conception doit apporter des contributions claires et vérifiables aux domaines de l'artefact de conception, des fondations de la conception, et/ou des méthodologies de conception.
- Directive 5 : la recherche en science de la conception repose sur l'application de méthodes rigoureuses aussi bien dans la conception que l'évaluation de l'artefact de conception.
- Directive 6 : la recherche d'un artefact efficace demande l'utilisation de moyens disponibles pour atteindre l'objectif tout en respectant les lois de l'environnement du problème.

- Directive 7 : la recherche en science de la conception doit être présentée de manière efficace à la fois à un public à vocation technologique qu'à un public orienté management.

2.2.4.2 Notre démarche de recherche

Notre recherche se situe très clairement dans le champ de la science de la conception, dans la mesure où nous cherchons à améliorer la planification collaborative dans le secteur de la construction par la proposition de simulations 4D/nD collaboratives dans lesquelles la visualisation est adaptée aux besoins métier de chaque participant. À cet effet, nous nous fixons comme objectif de concevoir une méthode devant aider les concepteurs d'outils (logiciels) de simulation 4D/nD à choisir les modes de représentation les plus appropriés et de spécifier les vues correspondant aux besoins identifiés.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons suivi la démarche résumée sur la Figure 40. La première étape de cette démarche consiste à comprendre les besoins métiers, c'est-à-dire les activités de planification collaborative dans le secteur de la construction. Pour cela, nous nous basons sur une revue bibliographique du domaine et notre expérience personnelle du secteur de la construction. La compréhension des pratiques de planification de la construction et des outils (de simulation 4D/nD, notamment) et méthodes utilisées par les professionnels (présentée dans les chapitres précédents) nous conduit au constat que les outils de simulation collaborative 4D/nD actuels ne se basent pas sur les vues métiers traditionnellement utilisées par les professionnels **(1)**. Nous rencontrons alors des professionnels que nous interviewons dans le but d'étudier leurs pratiques en matière de planification de la construction **(2)**. Il s'agit, avec cette évaluation, de vérifier la pertinence de notre compréhension des besoins du secteur, du point de vue des acteurs du secteur de la construction. Les éléments issus de cette évaluation, ajoutés à ceux de l'état de l'art, permettent de formuler la problématique et d'identifier les objectifs de la recherche **(3)**.

Après la formulation de la problématique, nous effectuons deux reculs théoriques importants, dans le but d'acquérir des outils pour une meilleure formulation et un meilleur positionnement de la problématique. Le premier recul théorique nous conduit vers la littérature relative à la visualisation et aux vues multiples coordonnées **(4)**. Le deuxième recul se fait vers les champs scientifiques liés au travail collaboratif assisté par ordinateur (TCAO) et à la Visualisation Collaborative **(5)**. À la lumière des enseignements de ce travail de revue bibliographique, nous sommes capables de conceptualiser la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction **(6)**, qui constitue un aspect majeur de la problématique. Une telle conceptualisation permet de mieux appréhender les composantes en jeu pour la proposition de solutions. Les différents concepts apportés sont utiles pour affiner la problématique et mieux la positionner par rapport aux travaux antérieurs similaires **(7)**.

Comme réponse aux besoins formulés dans la problématique, nous proposons une méthode de conception de vues nD adaptées **(8)**. En nous basant sur les recommandations de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles, nous proposons des métamodèles pour supporter les différentes étapes de la méthode **(9)**. Chaque métamodèle est construit et évalué de manière itérative sur des cas réels, de manière à l'améliorer, le consolider et le valider **(10)**. La méthode proposée est utilisée sur un cas réel de chantier de construction au Luxembourg, ce qui permet de proposer des vues différentes à des acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D de la construction, en fonction du rôle de

chacun **(11)**. Une enquête est ensuite réalisée auprès de professionnels du secteur de la construction pour évaluer l'utilité et l'adéquation de ces vues, ainsi que la pertinence des besoins identifiés pour chacun **(12)**.

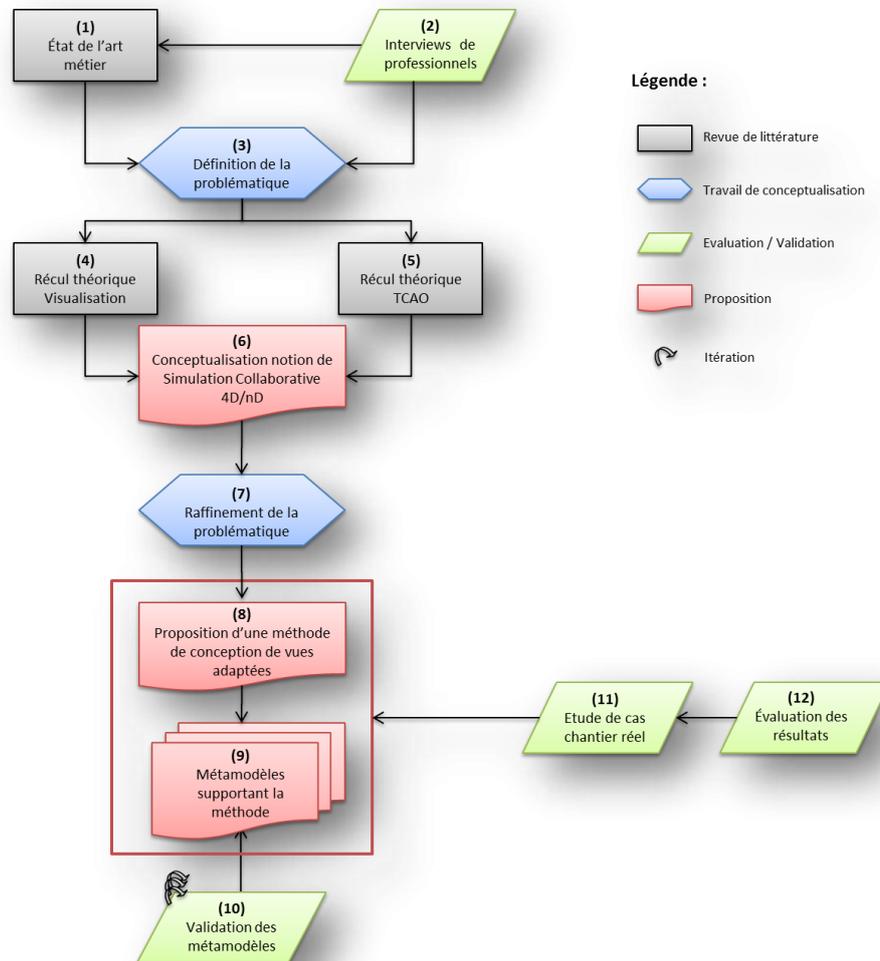


Figure 40 : Résumé de notre démarche de recherche

2.2.4.3 Les mécanismes d'évaluation utilisés

Vu l'importance de l'évaluation dans le paradigme de la recherche en science de la conception, nous proposons d'y consacrer ce paragraphe pour aider le lecteur à situer les mécanismes d'évaluation que nous utiliserons et leur justification. L'évaluation est, avec la logique (impérative ou prescriptive) et la recherche d'alternatives, l'un des trois aspects fondamentaux de la science de la conception (Pries-Heje et al. 2008). Elle concerne l'évaluation des résultats de la recherche, c'est-à-dire aussi bien les théories formulées que les artefacts (constructions, modèles, méthodes, instanciations). Concrètement, il s'agit de démontrer avec des méthodes rigoureuses l'utilité, la qualité et l'efficacité des propositions énoncées.

Pour réussir une recherche en science de la conception et en garantir un cadre d'évaluation pertinent, Pries-Heje et al. (2008) ont proposé un cadre stratégique faisant ressortir six étapes majeures, tel que représentées sur la Figure 41.

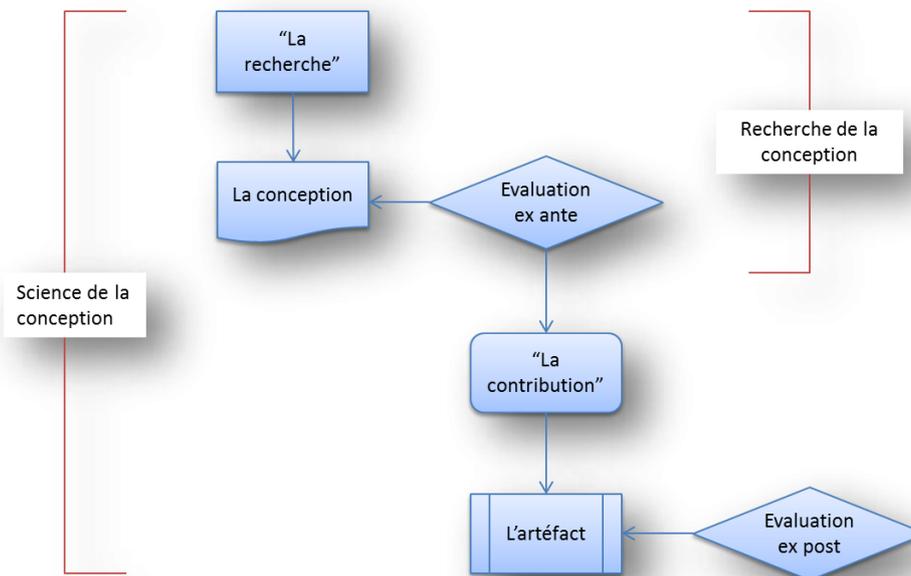


Figure 41 : Cadre stratégique pour l'évaluation d'une recherche en science de la conception (Pries-Heje et al. 2008)

On y retrouve les deux perspectives d'évaluation généralement utilisées : la perspective *ex ante* et la perspective *ex post*. En science de la conception, l'évaluation *ex ante* fournit des modèles pour évaluer théoriquement une proposition sans implémenter réellement le système ou la technologie. Dans cette optique, il n'est pas absolument nécessaire pour les chercheurs en science de la conception de construire un artefact pour évaluer une théorie (Pries-Heje et al. 2008). Dans la perspective *ex post*, le système (ou la technologie) est évalué après son implémentation. Pries-Heje et al. (2008) proposent de se poser 3 questions cruciales dans le choix de l'évaluation :

- quand évaluer ? Il faut ici déterminer si l'évaluation sera *ex ante*, *ex post*, ou les deux à la fois. Cela emmène notamment le chercheur à poser le contexte de l'évaluation en identifiant clairement les vrais utilisateurs, des organisations concernées, et des problèmes à résoudre ;
- quoi évaluer ? L'objet de l'évaluation déterminera le type d'évaluation à choisir. L'objet peut être le processus de conception ou bien le produit de la conception ;
- comment évaluer ? Cette question amène à se positionner par rapport aux formes naturaliste ou artificielle que pourrait prendre l'évaluation. Une évaluation naturaliste est réalisée dans un environnement réel avec des dispositifs réels, de manière à embrasser toutes les complexités de l'expérience humaine dans les organisations réelles. Une évaluation artificielle quant à elle va se faire de manière non réaliste, comme dans le cas d'expériences en laboratoire, les simulations, les expériences de terrain, les arguments théoriques, et les preuves mathématiques.

Pour revenir à notre contexte, nous envisagerons, comme le montre notre démarche résumée sur la Figure 40, les deux perspectives d'évaluation, *ex ante* et *ex post*. Notre évaluation *ex ante* concerne notre compréhension des besoins métiers et consiste en une série d'interviews avec les professionnels (2). Ceci nous permet de formuler des propositions pertinentes. Une fois ces propositions faites, nous les validons à travers une évaluation *ex post*, en appliquant la méthode proposée à un cas réel de chantier de construction (11). Nous soumettons les résultats de cette étude de cas à des professionnels du secteur de la construction, afin de juger de leur pertinence par rapport aux besoins métiers identifiés (12). Par ailleurs, tous les modèles proposés pour supporter notre proposition seront construits de manière itérative en les appliquant à des cas réels (10).

◆ Retenons, avant d'aller plus loin :

- 1) Des travaux précédents ont tenté d'améliorer la visualisation dans les simulations 4D/nD.
- 2) Certains chercheurs ont proposé l'utilisation de techniques particulières de visualisation ou d'interaction pour améliorer la perception des utilisateurs d'outils de simulation 4D.
- 3) D'autres ont expérimenté des modes de représentation de l'information répondant mieux aux besoins des acteurs que ceux proposés classiquement dans les outils 4D.
- 4) Les méthodes d'ingénierie des IHM pour la conception d'interfaces adaptées aux utilisateurs ne proposent pas de formalisme de description des besoins métier approprié à notre problématique.
- 5) Notre démarche de recherche, inspirée de la science de la conception, comporte 12 étapes et prévoit une évaluation *ex ante* et des évaluations *ex post*.

2.3 Bilan du chapitre

Nous avons formulé dans ce chapitre la problématique du besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD de la construction. À cet effet, nous avons présenté et défini la simulation 4D/nD à travers notamment la quatrième dimension dans la construction, les principes et définition de la simulation 4D, le passage progressif de la 4D à la nD, et l'intérêt pour le secteur. Nous avons montré qu'un intérêt de la simulation 4D/nD réside dans son apport visuel et dans sa capacité à faciliter la communication et la collaboration autour de la conception et l'utilisation d'un planning de chantier.

En établissant que la visualisation dans la simulation devrait être adaptée aux besoins réels des utilisateurs, nous avons suggéré que les vues proposées dans les outils de simulation 4D/nD soient adaptées au besoin de chaque utilisateur et conçues sur la base des vues métiers existant dans le secteur et habituellement choisies par les professionnels en fonction de leurs besoins spécifiques. Pour mieux positionner notre objectif, nous avons exploré quelques travaux similaires dont le but est

de proposer des modes de représentation 4D adaptés. Les méthodes d'ingénierie des IHM pour la conception d'interfaces adaptées ont également été explorées.

L'objectif de la thèse est de proposer une méthode de conception de vues adaptées dans les outils de simulation collaborative 4D/nD. Pour cela, il est primordial de proposer une compréhension claire et une conceptualisation de la notion même de « simulation collaborative 4D/nD » afin de raffiner la problématique. Ce travail fera l'objet de la première partie de notre proposition (Chapitre 5). Et pour y arriver, il nous faut d'abord faire un recul théorique vers la visualisation de l'information (Chapitre 3) et le travail collaboratif assisté par ordinateur (Chapitre 4).

Deuxième partie :

Recul théorique sur la visualisation et le travail coopératif assisté par ordinateur

Contenu :

Chapitre 3 : Théories de Visualisation de l'Information et de Vues Multiples Coordonnées

Chapitre 4 : Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur et Visualisation Collaborative

CHAPITRE 3

THÉORIES DE VISUALISATION DE L'INFORMATION ET DE VUES MULTIPLES COORDONNÉES



*"I visualize things in my mind before I have to do them.
It's like having a mental workshop."*

Jack Youngblood

3 Théories de Visualisation de l'Information et de Vues Multiples Coordonnées

Dans ce chapitre, nous effectuons un recul théorique sur la visualisation de l'information. Nous explorons dans un premier temps les théories de visualisation de l'information à travers notamment quelques définitions et principes de base, la sémantique graphique et la création de représentations visuelles et de vues. Dans une deuxième partie, nous étudions les vues multiples en évoquant l'intérêt et les critères d'utilisation de vues multiples coordonnées ainsi que les stratégies de coordination de ces vues.

3.1 Visualisation et représentations visuelles

3.1.1 Définitions et principes de base

Pour bien saisir la notion de visualisation, il est utile de comprendre d'abord le processus d'acquisition de la connaissance à partir des données. Le continuum de la compréhension (Figure 42) proposé par Shedroff, un des pionniers de l'*Experience Design*, montre que la compréhension est un continuum qui mène des données à la sagesse en passant par l'information et la connaissance (Shedroff 1999). Les données sont les matières premières trouvées ou créées à partir de plusieurs sources (recherche, création, collection, découverte, etc.) et utilisées dans la construction de la communication. Selon Shedroff (1999), les données sont facilement reconnaissables par le fait qu'elles sont souvent incomplètes ou sans rapport entre elles, voire ennuyeuses. Les données sont donc utiles aux producteurs ou à quiconque jouant un rôle de production, mais aussi à quelques consommateurs qui vont les transformer en informations, puis en connaissances. Pour avoir un sens dans la communication, les données doivent être transformées en information. Une telle transformation se fait en organisant les données dans une forme significative, en les présentant de manière significative et appropriée, et en communiquant le contexte qui l'entoure (Shedroff 1999). L'intégration de l'information avec l'expérience crée la connaissance, dans le sens où l'expérience

permet d'acquérir la connaissance nécessaire pour comprendre les choses. La sagesse, que Shedroff appelle aussi « méta-connaissance » est le niveau le plus élevé de la connaissance. La sagesse, contrairement à la connaissance, ne peut pas être directement transmise ou enseignée (Mazza 2009).

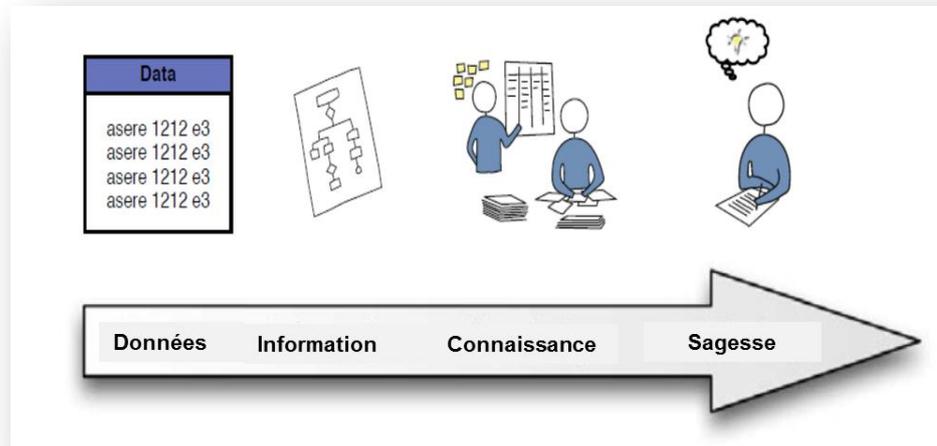


Figure 42 : Le continuum de la compréhension, selon Shedroff [Traduit de (Mazza 2009)]

Le passage des données à l'information fait généralement appel à l'utilisation de représentations graphiques. Selon Bertin, une représentation graphique est utile à la fois pour enregistrer, communiquer et traiter l'information (Bertin 1967). Larkin et Simon ont montré que pour exprimer une information, un diagramme vaut souvent dix mille mots grâce à ses propriétés intéressantes que sont notamment la localisation (dans une représentation visuelle, chaque élément a sa place dans l'espace physique), la réduction de l'étiquetage (l'être humain a la capacité de reconnaître une information représentée dans un format visuel, sans avoir besoin d'une description textuelle détaillée), et l'amélioration perceptuelle (Larkin & Simon 1987). Les représentations graphiques améliorent donc la perception, ce qui permet une meilleure visualisation de l'information présentée. La visualisation a en effet une place d'autant plus importante dans le continuum de la compréhension que plusieurs communautés scientifiques s'y consacrent activement. Mais qu'est-ce que la visualisation ?

3.1.1.1 La visualisation

Trois principaux domaines scientifiques se partagent l'étude de la visualisation. Il s'agit de la Visualisation Scientifique, de la Visualisation de l'Information et de la Géovisualisation. La Visualisation Scientifique est la discipline scientifique dont le but est la représentation visuelle des résultats d'expériences scientifiques ou de phénomènes naturels (Mazza 2009). La particularité de ces représentations est qu'elles se réfèrent à des données ayant une correspondance dans un espace physique. La Visualisation de l'Information quant à elle s'intéresse à des données abstraites tandis que la Géovisualisation traite de la visualisation de données géographiques.

Mazza (2009) définit la visualisation comme étant une activité cognitive faisant appel à des représentations visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation

mentale de l'objet représenté. Visualiser revient donc, en partie, à former un modèle mental ou une image mentale d'une chose ; ce qui, selon Spence, est une activité purement cognitive qui n'a rien à voir avec l'ordinateur (Spence 2007). Spence propose d'ailleurs de résumer l'activité de visualisation telle que présentée sur la Figure 43 dans laquelle des données sont transformées en images qui sont interprétées par un être humain. Pour lui, cette figure met l'accent sur le fait que la vue d'un encodage graphique de données cause assez souvent une réaction de compréhension (« Ah ha ! ») chez l'observateur, témoignant ainsi qu'il vient de faire une découverte utile.

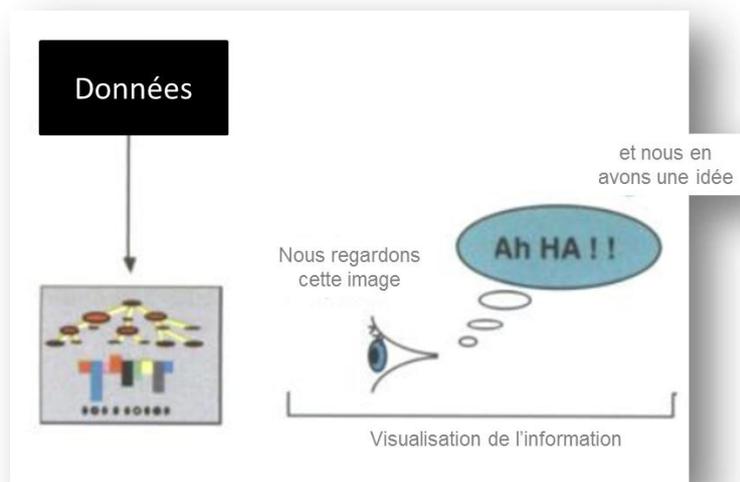


Figure 43 : Le processus de visualisation de l'information [Traduit de (Spence 2007)]

Mazza rappelle que le terme « modèle mental » est utilisé dans la littérature de psychologie cognitive pour désigner une sorte de « codification interne » au cerveau du monde externe, correspondant à la construction de connaissance que les hommes se font à partir du monde qui les entoure (Mazza 2009). Ceci peut être facilité par des propriétés visuelles (couleur, texture, forme, etc.) aidant à la construction d'une « carte visuelle » des données représentées (Mazza 2009). Le modèle mental créé à partir de la représentation extérieure permet donc à l'observateur de percevoir la réalité véhiculée et de la comprendre. La perception est donc un aspect crucial en visualisation et, avant d'aller plus loin, il est important de bien la comprendre.

3.1.1.2 La perception en visualisation

Bertin identifie quatre différents types de perception en visualisation (Bertin 1967). Il s'agit de la perception associative, de la perception sélective, de la perception ordonnée et de la perception quantitative. Selon lui, on utilise la perception associative pour l'égalisation d'une variation ou pour le regroupement des correspondances « toutes catégories de cette variation confondues » (Bertin 1967). En termes plus clairs, il s'agit par exemple d'isoler des catégories de taille ou de forme par regroupement des signes. On fait appel à la perception sélective pour retrouver une catégorie d'éléments. Il s'agit d'isoler les éléments d'une catégorie de manière à « abstraire tous les autres signes et percevoir l'image formée par la catégorie cherchée » (Bertin 1967). La perception ordonnée permet la comparaison de deux ou plusieurs ordres pour des signes d'une catégorie (ce signe vient avant ou après tel autre), tandis que la perception quantitative permet la définition du rapport entre

deux signes d'une catégorie en utilisant des nombres pour le regroupement des signes homogènes (Bertin 1967).

Par ailleurs, la perception humaine tend à organiser les éléments visuels selon des règles connues sous le nom de « principes de Gestalt ». Parmi ces principes, les plus connus sont la proximité, la similarité, la fermeture et la continuité. Selon le principe de proximité, les éléments sont perçus comme formant un groupe lorsqu'ils sont placés ensemble. Pour illustrer ce principe, Mazza donne l'exemple de la Figure 44 où les carrés sont placés sans proximité et donc perçus comme douze éléments séparés, alors que dans les images de centre et de droite, l'on perçoit des groupes d'éléments, même lorsque leurs formes ou leurs couleurs diffèrent (Mazza 2009).

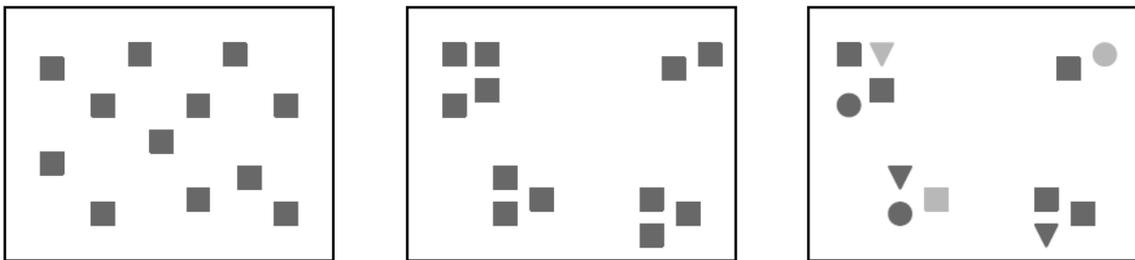


Figure 44 : Exemples du principe de proximité (Mazza 2009)

Le principe de similarité établit que des objets de forme, de taille, de couleur, d'orientation, et de texture différentes sont perçus comme formant ensemble un même groupe. Sur la Figure 45 tirée de (Mazza 2009), les objets des deux tailles distinctes semblent appartenir au même groupe sur l'image de gauche, et les carrés pleins et vides sont perçus comme associés et l'on semble voir une alternance de lignes de carrés pleins et vides.

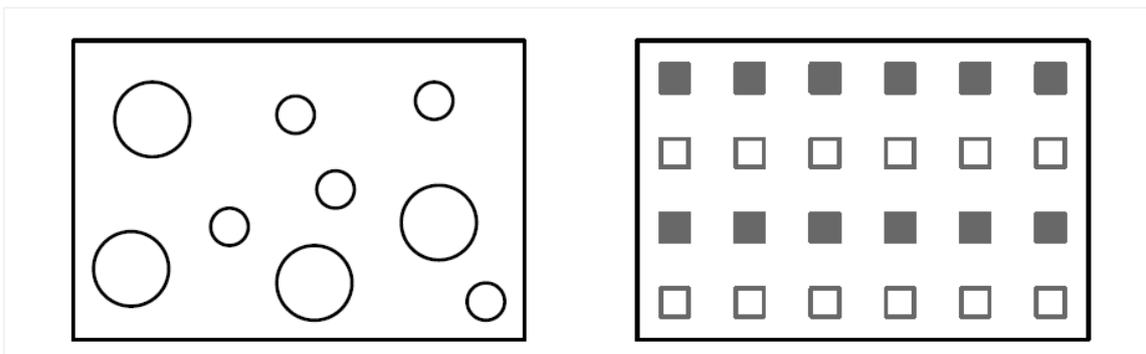


Figure 45 : Exemple du principe de similarité (Mazza 2009)

Selon le principe de fermeture, lorsqu'un objet n'est pas complet, ou que l'espace n'est pas entièrement clos, et que suffisamment d'éléments sont présents, alors les parties ont tendance à être regroupées et la figure entière est perçue. Sur la Figure 46, nous avons tendance à voir les figures complètes même lorsqu'une partie de l'information manque (à gauche et au centre) ou lorsque les éléments sont alignés de manière à les percevoir connectés (à droite).

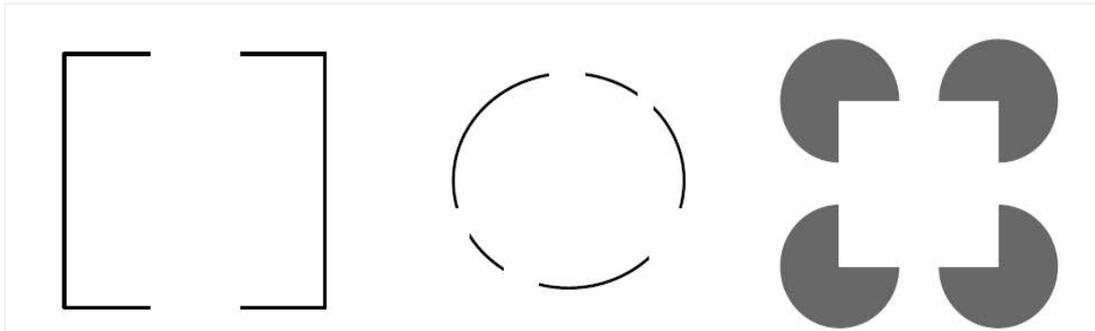


Figure 46 : Exemple du principe de fermeture (Mazza 2009)

Selon Mazza, après la perception des images, il est question de leur donner un sens et de les stocker dans la mémoire et cette série d'activités se passe dans le cerveau. Il est donc utile, avant d'aller plus loin, de comprendre la notion de mémoire.

3.1.1.3 La mémoire

Les théories de psychologie cognitive distinguent plusieurs types de mémoires. En nous appuyant sur Mazza qui cite différents auteurs, nous pouvons identifier trois grands types de mémoires, dont la connaissance est très importante dans la conception d'une représentation visuelle (Mazza 2009):

- La mémoire sensorielle : la mémoire sensorielle est définie comme étant l'aptitude du cerveau à retenir des impressions de signal venant des organes capteurs pour une période de temps très courte (250 à 500 millisecondes, ou moins). La mémoire iconique est l'appellation usuelle de la mémoire sensorielle visuelle, capable de stocker de l'information visuelle à partir des yeux, automatiquement et indépendamment du contrôle conscient. C'est la raison pour laquelle le traitement de l'information ayant lieu dans la mémoire iconique est appelé traitement préattentif, puisqu'elle ne nécessite pas une attention soutenue. Les quelques attributs visuels détectés lors du traitement préattentif sont les attributs préattentifs (couleur, contraste, taille, etc.) que nous aborderons plus loin. Selon Mazza, le traitement visuel préattentif est fondamental dans la création de représentations visuelles puisque les attributs visuels préattentifs sont perçus par l'utilisateur presque instantanément, sans l'intervention de la conscience.
- La mémoire à court terme : La mémoire à court terme est la mémoire à capacité de stockage limitée (de 5 à 9 éléments d'égale importance) vers laquelle sont transférées, pour y rester de quelques secondes à une minute, certaines des informations contenues dans la mémoire sensorielle. La durée de stockage peut s'étendre à quelques heures si le transfert est périodiquement répété. L'organisation de l'information en morceaux peut augmenter la capacité de la mémoire à court terme, ce qui est par exemple le cas de la mémorisation des numéros de téléphone en morceaux de deux ou trois chiffres. Un exemple d'organisation de l'information en morceaux, en représentation graphique, consiste à encoder, dans un diagramme à barres, un attribut de catégorie avec des barres de couleurs différentes. Il est par contre important d'éviter d'utiliser un trop grand nombre de morceaux à garder en mémoire.
- La mémoire à long terme : Il est possible de transformer la mémoire à court terme en utilisant un processus appelé *potentialisation à long terme*. Ceci s'apparente à de

l'apprentissage dont le but principal est de renforcer les synapses neuronales. Il s'agit par exemple de répéter périodiquement ou de faire des associations significatives, ce qui permet d'arriver stocker l'information pendant plusieurs années et même à vie.

3.1.2 Représentations visuelles et vues en visualisation de l'information

Avec l'évolution de l'informatique, plusieurs outils existent pour aider les utilisateurs dans la création de représentations visuelles de données abstraites. Selon Mazza (2009), même si ces outils diffèrent grandement les uns par rapport aux autres, ils suivent tous le même processus de génération de représentations visuelles. Il propose un modèle de référence en plusieurs étapes pour rendre compte de ce processus. Ce processus, qui s'inspire notamment de ceux utilisés pour le reporting dans les applications décisionnelles et du modèle de Haber et McNabb (Haber & McNabb 1990), identifie trois étapes différentes à savoir le prétraitement et les transformations des données, la cartographie visuelle et la création des vues. Nous proposons un résumé du processus de création de représentation visuelle à travers la Figure 47.

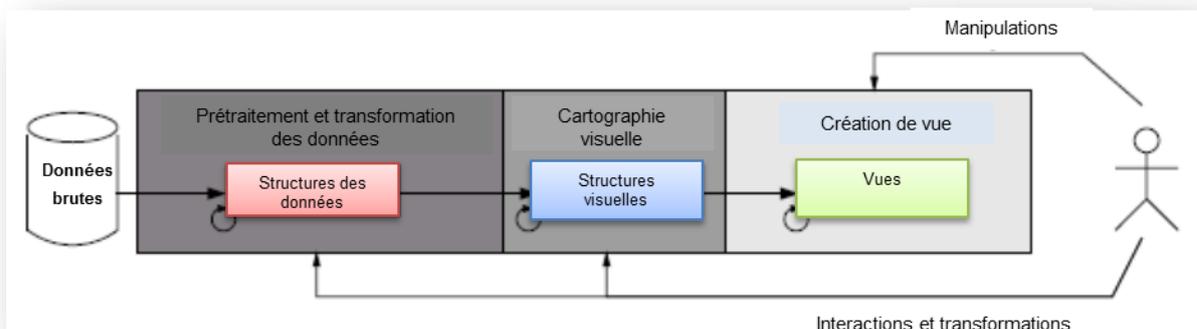


Figure 47 : Le processus de génération d'une représentation graphique [Traduit de (Mazza 2009)]

3.1.2.1 Les types de données

Comme la Figure 47 le montre, les données utilisées pour la création de représentations visuelles sont des données brutes qu'il est nécessaire de prétraiter avant leur utilisation. Selon Mazza (Mazza 2009), ces données peuvent provenir d'outils (par exemple, les valeurs de certains agents polluants prises à partir d'une station de surveillance au cours des essais de pollution), être générées par des logiciels appropriés (par exemple, les données de prévision météorologique), ou même liées à des événements ou des entités mesurables de la nature ou du monde social (par exemple, le nombre d'habitants ou les taux de naissances dans les villes d'un état). Elles ne sont généralement pas fournies avec une structure logique précise ; ce qui oblige, avant de les utiliser dans un logiciel de représentation graphique, à leur donner une structure logique organisée (Mazza 2009).

Pour la structuration des données, Keim (2002) propose de les classer en formats de différents types : les données unidimensionnelles, les données bidimensionnelles, les données multidimensionnelles, les textes et hypertextes, les hiérarchies et graphes, les algorithmes et programmes.

- **Les données unidimensionnelles** : Selon Keim, ce sont les données n'ayant qu'une seule dimension. C'est le cas typique des données comme, par exemple, les chronologies d'actualités.
- **Les données bidimensionnelles** : Keim définit les données bidimensionnelles comme étant celles ayant deux dimensions distinctes. Les données géographiques, avec une longitude et une latitude, sont des exemples de ce format de données. La méthode courante pour représenter ces données est celle du système d'axes X-Y.
- **Les données multidimensionnelles** : Pour Keim, plusieurs ensembles de données ont plus de trois attributs et ne sont pas visualisables simplement avec des axes bidimensionnels ou tridimensionnels. Les tableaux issus de bases de données relationnelles, avec souvent des dizaines voire des centaines de colonnes (attributs), sont des exemples typiques de ce format de données.
- **Le texte et l'hypertexte** : Keim justifie ces formats par le fait que tous les types de données ne peuvent pas être décrits en termes de dimensionnalité. À l'ère d'Internet, le texte, l'hypertexte et les contenus des pages web multimédias constituent des types de données importants. La particularité de ce type de données réside dans le fait qu'elles ne sont pas facilement descriptibles par des nombres, ce qui rend les techniques de visualisation standards inefficaces pour les gérer. Il est nécessaire, dans la plupart des cas, de les transformer dans des vecteurs de description avant de pouvoir utiliser les techniques de visualisation.
- **Les hiérarchies et les graphes** : Les entrées de données ont souvent des relations avec d'autres pièces d'information. Selon Keim, les graphes sont très utilisés pour représenter ces interdépendances. Un graphe est un ensemble d'objets, appelés nœuds, et des connexions entre ces objets appelées arêtes.
- **Les algorithmes et les programmes** : Une autre classe de données est celle des algorithmes et programmes. Le support au développement logiciel peut faire appel à l'aide à la compréhension d'algorithmes incluant l'affichage du flux d'information dans un programme ou la représentation de la structure de milliers de lignes de code source.

Shneiderman (1996), quant à lui, propose de classifier les données en sept types :

- **Les données unidimensionnelles** : cette catégorie inclut les données linéaires telles que les documents textuels, les codes sources de programmes informatiques, les listes. La particularité de ces données est qu'elles sont toutes organisées de manière séquentielle et chaque item de la collection est une ligne de texte contenant une chaîne de caractères.
- **Les données bidimensionnelles** : Il s'agit ici des données planaires telles que les cartes géographiques, les plans ou encore les mises en pages de journaux. Chaque item de la collection couvre une partie de la surface totale et peut être de forme rectangulaire ou non. Chaque item possède des attributs liés au domaine de la tâche (nom, propriétaire, valeur, etc.) et des fonctionnalités liées au domaine de l'interface (taille, couleur, opacité, etc.). Plusieurs systèmes adoptent une approche multicouche pour traiter les données cartographiques, mais chaque couche doit être considérée comme étant bidimensionnelle.
- **Les données tridimensionnelles** : cette catégorie regroupe les données du monde réel telles que les molécules, le corps humain, les constructions. Toutes ces données ont des

éléments avec un volume et des relations potentiellement complexes avec d'autres éléments. Les systèmes de CAO pour architectes, modeleurs de solides et ingénieurs mécaniques sont conçus pour gérer ces types de relations tridimensionnelles complexes.

- **Les données temporelles** : Les échéanciers sont très utilisés et vitaux dans plusieurs domaines (dossiers médicaux, gestion de projet, gestion d'historiques, etc.) pour créer des données différentes des données unidimensionnelles. La différence majeure entre ces données et les données unidimensionnelles réside dans le fait que les items des données temporelles ont une date de début et une date de fin et que ces items peuvent se chevaucher.
- **Les données multidimensionnelles** : La plupart des bases de données relationnelles et statistiques sont idéalement manipulées comme des données multidimensionnelles dans lesquelles les items avec n attributs deviennent des points dans un espace à n dimensions. La représentation dans une interface peut se faire via des nuages de points bidimensionnels avec des dimensions supplémentaires, chacune contrôlée par un curseur.
- **Les hiérarchies ou arbres** : les hiérarchies ou les arbres sont les collections d'items dans lesquelles chaque item a une liaison avec un item parent (sauf la racine). Les items et les liaisons entre parent et enfant peuvent avoir plusieurs attributs.
- **Les réseaux** : il arrive souvent d'avoir une collection avec des items dont les relations ne peuvent pas être convenablement décrites avec une simple structure hiérarchique, et qu'il soit nécessaire d'avoir des items reliés à un nombre arbitraire d'autres items. On parlera dans ce cas de réseau. Il est à noter qu'il existe plusieurs cas particuliers de réseaux (acycliques, treillis, avec ou sans racine, orientés ou non orientés, etc.).

3.1.2.2 Cartographie visuelle

La cartographie visuelle consiste à définir les structures visuelles correspondant aux données à représenter visuellement (Mazza 2009). Selon Mazza, les trois structures à définir sont le substrat spatial, les éléments graphiques et les propriétés graphiques.

Le substrat spatial, qui peut être décrit en termes d'axes, définit les dimensions dans l'espace physique où la représentation visuelle est créée (Mazza 2009). Dans un espace cartésien par exemple, les abscisses (x) et les ordonnées (y) correspondent au substrat spatial et chacun de ces axes peut avoir un type différent, en fonction du type (quantitatif, ordinal, nominal) de données à représenter (Mazza 2009).

Les éléments graphiques sont tous les éléments visibles dans l'espace de création de représentation visuelle. Selon Mazza, quatre types d'éléments visuels sont possibles : les points, les lignes, les surfaces et les volumes (Figure 48).

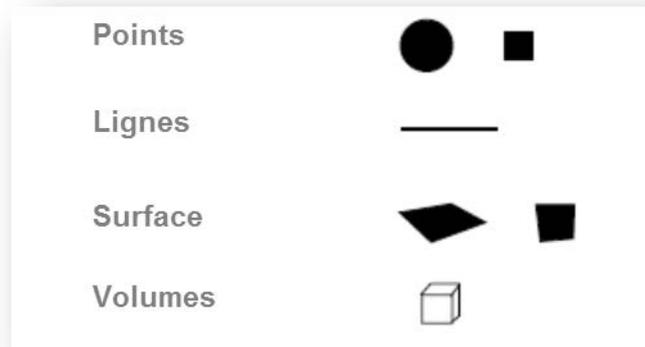


Figure 48 : Exemples d'éléments graphiques (Mazza 2009)

Les propriétés graphiques (encore appelées variables rétiniennes) sont les propriétés des éléments graphiques auxquelles la rétine de l'œil humain est très sensible (Mazza 2009). Bertin (Bertin 1967) identifie six grandes classes de variables rétiniennes :

- **La couleur** : il s'agit de « la différenciation sensible, généralement provoquée par des excitations colorées différentes, que l'on peut percevoir entre deux plages de même valeur » (Bertin 1967). Selon Mazza, une attention particulière doit être portée à la variable couleur parce qu'elle est la seule propriété graphique dont la perception peut dépendre de facteurs physiologiques, linguistiques et culturels. Des études sur la perception, il ressort que six couleurs seulement semblent avoir la même appellation et la même perception partout. Ces couleurs sont le blanc, le noir, le rouge, le vert, le jaune, et le bleu (Ware 2004). La couleur est, de l'avis de Bertin, une variable sélective excellente qui est très mémorisable, qui peut très facilement être combinée avec d'autres variables, et qui peut exercer une attraction psychologique indéniable (Bertin 1967). Dans le système de couleurs HSL, chaque couleur est considérée comme étant une composition des trois éléments du système que sont la teinte, la saturation et la luminosité (Mazza 2009). Les noms de couleurs que nous utilisons (vert, jaune, rouge, etc.) correspondent en général à la teinte de la couleur, tandis que la saturation et la luminosité déterminent son intensité.
- **Le grain** : le grain est défini par Bertin comme étant, « dans une valeur ordonnée [...] la quantité de tâches séparables contenues dans une surface unitaire » (Bertin 1967). Sa variation va donc des grains nuls (petits grains que l'œil ne peut identifier) aux grains grossiers ou importants. Bertin précise que la quantité de tâches est inversement proportionnelle à la notion de grain et donne l'exemple d'une trame de 300 dpi (points par inch) qui sera considérée comme grain très fin tandis qu'une trame de 50 dpi sera considérée comme étant un grain grossier.
- **La valeur** : selon Bertin, « la variation de valeur est la progression continue que l'œil perçoit dans la suite des gris qui s'échelonnent du noir au blanc [...]. Cette progression est indépendante de la couleur et l'on peut passer du noir au blanc par les gris, par les bleus, par les rouges ».
- **La taille** : Bertin explique la perception de la variation de taille par les stimuli sensibles constitués par la variation de surface d'une figure quelconque. Elle est dissociative et

domine toute autre propriété qui interfère avec elle. Puisque l'œil ne peut différencier que jusqu'à vingt paliers entre deux points de rapport de surface entre 1 et 10, une « gamme naturelle des tailles croissantes » a été proposée et « contient les paliers nécessaires et suffisants pour toute représentation quantitative » (Bertin 1967).

- **La forme** : pour Bertin, « une tâche de surface constante peut prendre une infinité de formes différentes » (Bertin 1967).
- **L'orientation** : Bertin définit les stimuli de la variation d'orientation comme étant constitués par « la différence d'angle entre des champs créés par plusieurs signes parallèles » (Bertin 1967).

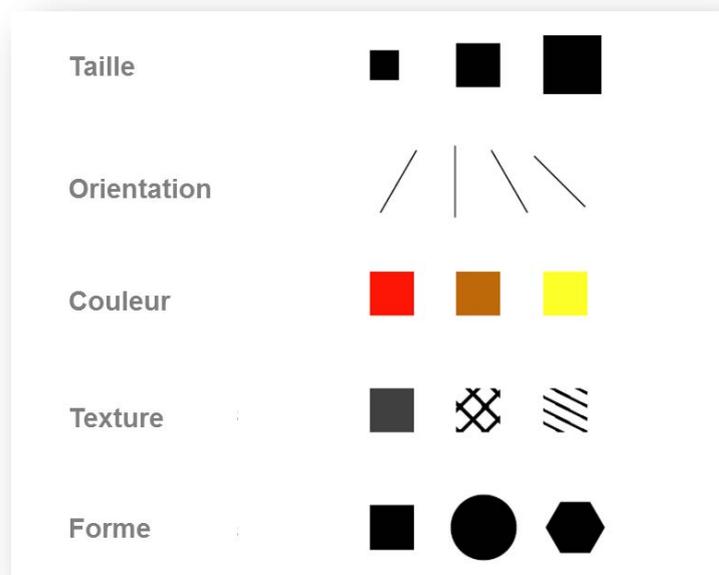


Figure 49 : Quelques exemples de propriétés graphiques (Mazza 2009)

Les propriétés graphiques ne sont pas toutes utilisées de la même manière dans la perception. Certaines d'entre elles sont préattentives, c'est-à-dire qu'elles sont immédiatement détectables sans qu'on ait besoin de se concentrer sur la représentation visuelle.

3.1.2.3 Les propriétés préattentives

Selon Healey, la découverte de propriétés visuelles traitées de manière préattentive est l'un des résultats intéressants des recherches s'intéressant à la manière dont le système visuel humain analyse les images (Healey 1992). Ces propriétés, appelées propriétés préattentives, sont immédiatement détectées par le système visuel, avant même que l'utilisateur ne concentre son attention sur l'image pour déterminer la présence ou l'absence d'éléments avec la propriété donnée. Sur la première image (a) de la Figure 50 par exemple, le cercle rempli noir se remarque tout de suite.

Healey recommande d'utiliser les propriétés préattentives pour mettre en évidence les caractéristiques importantes de l'image (Healey 1992). À cet effet, il rapporte qu'elles ont été utilisées dans le cadre d'expériences en psychologie pour la réalisation de tâches visuelles telles que :

- la détection de cible, où les utilisateurs sont invités à détecter rapidement et de façon précise la présence ou l'absence d'un élément « cible » utilisant une propriété préattentive unique dans un ensemble d'éléments « distrayants ». Sur la Figure 50, le cercle rempli qui est la cible peut être détectée de manière préattentive dans l'image de gauche (a) parce qu'il est le seul à avoir l'attribut « rempli ». Sur l'image de droite par contre (b), le cercle rempli ne peut pas être détecté de manière préattentive, car il ne contient aucun attribut préattentif le différenciant des autres éléments.

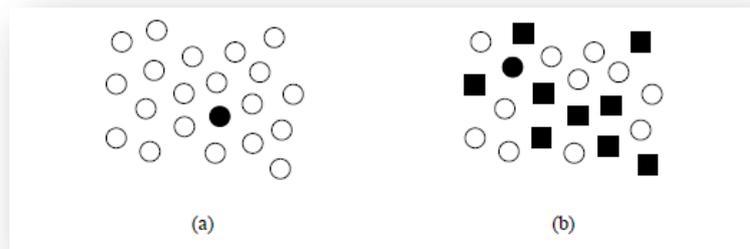


Figure 50 : Exemple de détection de cible (Healey 1992)

- La détection de frontière, où l'on demande aux utilisateurs de détecter rapidement et avec précision une frontière de texture entre deux groupes d'éléments, dans lesquels les éléments de chaque groupe ont une propriété préattentive commune (Figure 51). Sur l'image de gauche (a), une frontière horizontale entre deux groupes est réalisée de manière préattentive parce que chaque groupe possède un attribut unique (rempli ou vide). Sur l'image de droite (b) par contre, la frontière n'est pas apparente parce que les deux groupes partagent les mêmes attributs (cercle ou carré, rempli ou vide).

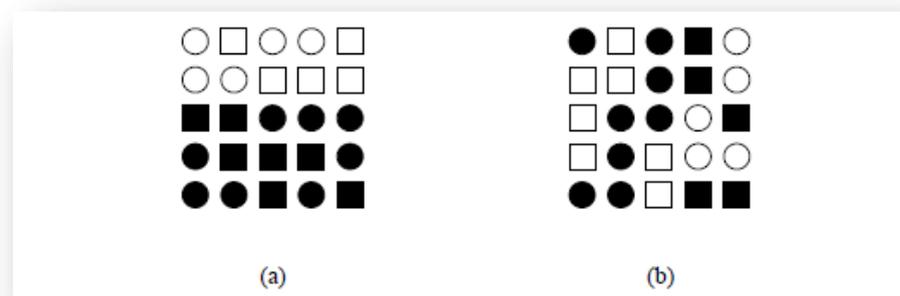


Figure 51 : Exemple de détection de contours (Healey 1992)

- le comptage, où les utilisateurs essaient de compter ou d'estimer le nombre d'éléments dans un affichage utilisant une propriété préattentive unique.

Mazza se base sur des travaux précédents pour identifier quatre principales catégories de propriétés préattentives (Mazza 2009). Il s'agit de la **couleur**, de la **forme**, du **mouvement** et de la **position spatiale**.



Figure 52 : Exemple montrant que la teinte et l'intensité de la couleur sont traitées de manière préattentive (Mazza 2009)

Pour Mazza, la teinte et l'intensité d'une couleur sont traitées de manière préattentive et marchent très bien dans la détection visuelle d'éléments, sans le recours à une recherche séquentielle (Figure 52). Les attributs préattentifs de la forme sont listés dans le Tableau 7 et illustrés par la Figure 53. Ceux de la position spatiale peuvent être la position 2D, la profondeur stéréoscopique, ou la concavité. Le mouvement quant à lui est le meilleur moyen d'attirer l'attention. Il faut distinguer deux attributs qui sont le scintillement (*flicker*) et le geste (*motion*) qui sont très utilisés, notamment pour les sites web et les tableaux de bord, pour attirer l'attention des utilisateurs, surtout dans des cas où une intervention immédiate est requise.

Tableau 7 : Attributs préattentifs de la forme [Traduit de (Mazza 2009)]

Attribut	Exemple
Orientation	Une ligne avec une orientation différente de celle des autres
Longueur	La longueur des barres dans un diagramme à barres
Largeur	La largeur d'une ligne
Taille	La taille d'une forme, pour classer un attribut particulier des données
Colinéarité	Des lignes qui suivent la même direction
Courbure	Des lignes et des bordures d'objet qui peuvent être droites ou courbes
Regroupement spatial	Groupes d'objets, comme par exemple un cluster
Marques ajoutées	Ajout d'une marque dans un ensemble d'objets pour mettre en évidence l'un en particulier
Forme	Un carré dans un groupe de cercles
Numérosité	Cardinalité dans un groupe d'objets

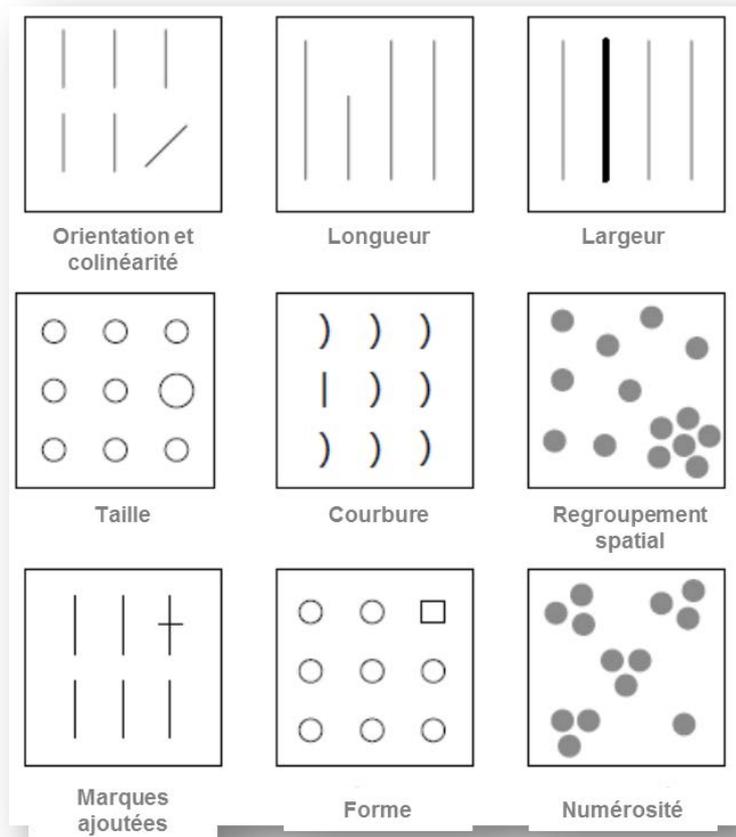


Figure 53 : Attributs préattentifs de la forme (Mazza 2009)

La connaissance de ces différents aspects permet de créer des représentations visuelles des données capables d'amplifier la cognition. Cette création peut se faire avec ou sans le support des outils informatiques. Dans tous les cas, il est intéressant de connaître les questionnements et les critères pour la création de bonnes représentations visuelles.

3.1.3 La création de représentations visuelles

3.1.3.1 Questionnements pour la création de représentations visuelles

Les vues sont le fruit du mappage des structures de données avec les structures visuelles et de la génération de représentations visuelles dans un espace physique qui peut être représenté par l'ordinateur (Mazza 2009). Pour la création de représentations visuelles efficaces, Mazza (2009) propose cinq questionnements importants, qui sont :

1. **le problème** : pour définir clairement ce qu'il faut représenter, la première chose à faire est d'identifier clairement les besoins réels des utilisateurs et la manière dont ils travaillent. Cela est utile pour le choix des bons modèles visuels et pour permettre aux utilisateurs de bien comprendre l'information présentée. Ce questionnement confirme le besoin que nous avons, par rapport à notre problématique de recherche, de bien comprendre les besoins réels de chaque utilisateur d'une simulation collaborative nD. Mazza ne donnant pas plus de précision

sur la manière de décrire ces besoins, nous explorerons à cet effet les théories sur le travail coopératif et la visualisation collaborative, dans le prochain chapitre ;

2. **la nature des données** : il est important d'examiner attentivement la nature des données à représenter. Elles peuvent être quantitatives, ordinales, ou catégorielles. Les données quantitatives sont par exemple une liste de nombres entiers ou réels. Les données ordinales sont les données de nature non numérique qui ont leur propre ordre intrinsèque, comme les jours de la semaine ou les mois de l'année. Quant aux données catégorielles, elles n'ont pas d'ordre intrinsèque (noms de villes, noms de personnes, etc.). La nature des données est donc à différencier des types de données que nous avons présentés plus haut et qui se rapportent à leur format. Dans la suite du travail, nous garderons ces deux notions (types de données et natures des données) avec leurs sens respectifs ;
3. **le nombre de dimensions** : pour Mazza (2000), du nombre de dimensions des données va dépendre le type de représentation à utiliser. Les dimensions correspondent aux attributs des données, qui peuvent être dépendants ou indépendants. Les attributs dépendants vont varier et leur comportement sera analysé en fonction d'autres attributs indépendants. En fonction du nombre d'attributs dépendants, on qualifiera les collections de données uni-variées (une dimension variant en fonction d'une autre), bi-variées (deux dimensions dépendantes), tri-variées (trois dimensions dépendantes), ou multi-variées (quatre dimensions ou plus, variant en fonction d'attributs indépendants) ;
4. **les types de données et les structures de représentation**: la connaissance des types de données est essentielle dans le choix des structures de représentation appropriées. Nous avons présenté, dans le paragraphe 3.1.2.1 du chapitre 3, quelques classifications des types de données. Concernant les structures de représentation, Lohse et *al.* (1994) proposent de les regrouper en onze catégories différentes : les diagrammes de structure, les cartogrammes, les plans, les icônes, les diagrammes de processus, les diagrammes temporels, les diagrammes réseaux, les images, les tableaux, les tableaux graphiques, les graphes.
5. **le type d'interaction** : Mazza estime que le type d'interaction détermine si la représentation visuelle est statique, transformable ou manipulable. Une représentation statique est par exemple une image imprimée sur papier ou affichée sur un écran d'ordinateur et non modifiable par l'utilisateur. On parlera de représentation transformable lorsque l'utilisateur peut contrôler le processus de modification et de transformation des données comme le fait de faire varier des paramètres de saisie des données, faire varier les extrêmes des valeurs de certains attributs, ou choisir un mappage différent pour la création de vue. La représentation sera manipulable si l'utilisateur peut contrôler et modifier des paramètres régulant la génération des vues, comme par exemple zoomer sur un détail ou faire une rotation sur une image 3D.

3.1.3.2 Interactions et tâches de visualisation

L'interaction est une notion importante de la visualisation de l'information. Si l'informatique permet la visualisation de quantités considérables d'information, ces quantités d'information ne cessent de

croître. Le but de la visualisation de l'information étant de proposer des représentations visuelles correspondant aux besoins des utilisateurs, l'on se heurte souvent à deux limites très importantes :

- À partir d'une certaine quantité, l'espace de représentation ne permet généralement pas aux techniques de visualisation d'afficher toute l'information que l'utilisateur a besoin de visualiser ;
- Lorsque l'espace de représentation le permet, l'affichage simultané de trop d'information entraîne souvent chez l'utilisateur l'atteinte de la limite cognitive au-delà de laquelle l'utilisateur, surchargé, a du mal à assimiler l'information ;

Les techniques d'interaction permettent de donner la possibilité à l'utilisateur de naviguer à travers la vue et de manipuler les données de manière à faire correspondre le contenu de la vue à la tâche de visualisation qu'il réalise. Shneiderman (1996) a proposé un mantra décrivant la recherche visuelle d'information par un utilisateur : « *Overview first, zoom and filter, then details-on-demand* ». Ce mantra, tout identifiant sept tâches principales réalisées par l'utilisateur (à un haut niveau d'abstraction), montre l'ordre dans lequel ces tâches sont réalisées : il s'agit d'abord d'avoir un aperçu de la collection entière (*overview*) avant de zoomer sur des items qui l'intéressent (*zoom*) ou de filtrer les items qui ne l'intéressent pas (*filter*). Une fois les items de son choix sélectionnés, l'utilisateur peut au besoin demander des détails à leur propos (*details-on-demand*). Ces détails peuvent concerner les relations entre les items (*relate*), l'historique des actions pour permettre leur annulation, leur reprise ou leur raffinement progressif (*history*), ou l'extraction de sous-collections (*extract*).

Comme nous l'avons dit plus haut, il faut distinguer les représentations statiques, les représentations manipulables et les représentations transformables. Les représentations statiques ne permettront aucune interaction. Les représentations manipulables donneront à l'utilisateur la possibilité d'intervenir et de manipuler la vue proposée. Mazza (2009) identifie trois catégories de techniques d'interaction pour la manipulation des vues : *scrolling*, *overview + details*, et *focus + context*. Le *scrolling* consiste à utiliser des barres de mouvement (*scrollbar*) pour déplacer la partie visible à l'écran de la représentation. C'est l'une des techniques les plus utilisées sur un ordinateur. L'*overview + details* affiche à l'écran une partie détaillée de la vue tout en affichant une autre vue moins détaillée de la représentation entière. Le *focus + context* consiste à afficher simultanément dans la même zone l'information détaillée (*focus*) et l'information contextuelle (*context*) sans utiliser deux vues séparées. En ce qui concerne les représentations transformables, elles donnent la possibilité à l'utilisateur d'intervenir et de manipuler les données en phase de prétraitement et/ou de cartographie visuelles. Plusieurs techniques d'interaction permettent à l'utilisateur de réaliser ces types de transformation : le filtre des données en entrée, la réorganisation des données, les requêtes dynamiques, etc.

Deux autres concepts sont importants pour définir la notion d'interaction. Il s'agit du niveau d'interactivité et du mode d'interaction. Otjacques se base sur Tweedie (Tweedie 1997) pour identifier cinq niveaux d'interactivité différents : interaction manuelle, interaction mécanisée, interaction enseignable, interaction guidable, interaction automatique (Otjacques 2009). En ce qui concerne le mode d'interaction, Spence en distingue quatre sortes à savoir l'interaction continue, l'interaction par étapes, l'interaction passive, et l'interaction composite (Spence 2007).

Winckler et al. (2004) différencie la notion d'interaction de celle de tâche de visualisation de l'utilisateur. En se basant sur (Wehrend 1990), Winckler et al. (2004) proposent une liste de tâches de visualisation : localiser, identifier, distinguer, catégoriser, regrouper (*cluster*), distribuer, classer (*rank*), comparer, associer, corrélérer. Cette liste est bien évidemment loin d'être exhaustive. Valiati et al. (2006) proposent quant à eux une taxonomie des tâches pour guider l'évaluation des visualisations multidimensionnelles. Cette taxonomie identifie sept catégories de tâches génériques à savoir : identifier, déterminer, comparer, déduire, configurer, localiser, visualiser. La Figure 54 montre ces différentes tâches avec les objets de la représentation visuelle auxquels elles s'appliquent.

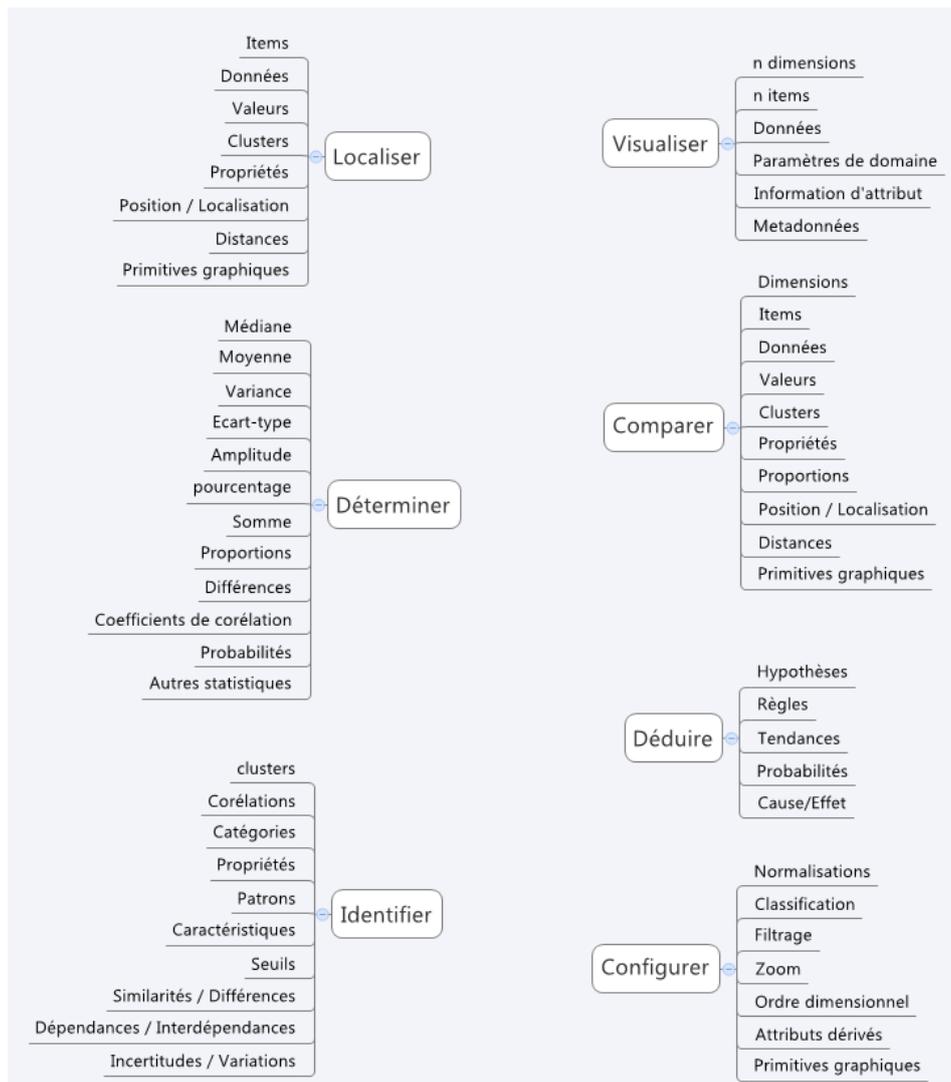


Figure 54 : Taxonomie des tâches de visualisation de Valiati et al. (Valiati et al. 2006)

Il est également utile d'évoquer la taxonomie de « tâches basiques de visualisation » proposée par Chuah et Roth et qui décrit trois principales classes de d'opération (Chuah & Roth 1996) :

- les opérations graphiques : ces opérations changent l'apparence de la vue ;
- les opérations sur les données : ces opérations manipulent les données affichées par les vues ; et

- les opérations sur les ensembles : ces opérations créent et manipulent des ensembles de données.

3.1.3.3 Critères pour une bonne représentation visuelle

Une bonne représentation peut être définie comme étant celle qui satisfait entièrement les besoins analytiques et de communication de ceux pour qui elle a été pensée et créée (Mazza 2009). Plusieurs critères permettent de différencier une bonne représentation visuelle d'une médiocre. Parmi ces critères, Mazza cite l'excellence graphique, l'intégrité graphique, la maximisation du ratio données – encre, et l'esthétique.

- **L'excellence graphique** : pour illustrer ce critère, Mazza cite les travaux de Tufte (Tufte 1990; Tufte & Weise Moeller 1997; Tufte 2001) selon qui une bonne image est une représentation bien construite de données intéressantes. L'image est entendue ici comme étant une représentation visuelle. Il s'agit, selon lui, de présenter et de communiquer des idées complexes de manière simple, précise et efficace. Se pose alors la question de la mesure de ce critère qui n'est pas une chose facile au vu de son caractère subjectif. En effet, si le but est de communiquer de manière simple, précise et efficace, cette efficacité pourrait dépendre de la capacité des individus à percevoir le message ainsi que du contexte de visualisation ;
- **L'intégrité graphique** : selon Tufte, l'intégrité graphique est relative au fait que la représentation graphique ne devrait en aucun cas créer une distorsion ou de fausses interprétations des données (Tufte 2001). La représentation des données numériques, représentées à la surface d'un graphique par exemple, doit être directement proportionnelle aux quantités numériques qu'elles représentent, doit montrer les variations de données et non les variations de l'image, et le nombre de dimensions de l'image ne doit pas excéder le nombre de dimensions des données (Mazza 2009);
- **La maximisation du ratio données–encre** : Pour Tufte cité par Mazza, il est important dans la création de représentations visuelles de ne pas surcharger l'utilisateur avec trop d'éléments et la présence de décorations inutiles ou de perspectives superflues ne rend pas le visuel en lui-même plus attractif, mais ne fait qu'attirer l'attention de l'utilisateur hors de ce que l'image est censée communiquer (Mazza 2009). Tufte propose une formule pour maximiser le ratio données–encre qui se décline comme suivant l'équation ci-dessous. Il s'agit de calculer la quantité d'encre utilisée pour représenter les vraies données et de la comparer à la quantité d'encre avec la quantité d'encre utilisée pour enrichir visuellement l'image avec des décorations et autres éléments visuels ; le but étant de maximiser le ratio données–encre.

$$\text{Ratio données – encre} = \frac{\text{encre pour les données}}{\text{encre totale utilisée}}$$

- **L'esthétique** : Pour Tufte, l'on atteint l'élégance dans les visuels en faisant correspondre la complexité des données avec la simplicité de la conception. La meilleure manière d'atteindre cette élégance est de concevoir la représentation en accordant une grande attention au détail, en évitant les manques dans la décoration et en choisissant un format de représentation approprié. Comme le critère de l'excellence graphique,

l'esthétique présente un caractère subjectif qui rend difficile sa mesure. Comme nous l'avons vu plus haut dans la présentation des propriétés graphiques, la perception de la couleur par exemple peut dépendre de facteurs physiologiques, linguistiques ou même culturels.

◆ **Retenons, avant d'aller plus loin :**

- 1) La prise en compte des aspects cognitifs est importante dans la perception des utilisateurs en matière de visualisation.
- 2) Les trois étapes de la création de représentations visuelles font intervenir la structuration des données, le substrat spatial, les propriétés graphiques et les propriétés préattentives.
- 3) Pour créer des vues appropriées, il faut répondre à un certain nombre de questionnements (le problème, la nature des données, le nombre de dimensions, la structuration, le type d'interaction).
- 4) Il faut aussi respecter des critères tels que l'excellence graphique, l'intégrité graphique, le ratio données-encre et l'esthétique.

Il arrive couramment d'avoir recours à plusieurs vues coordonnées pour percevoir et comprendre une réalité. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons aborder la thématique des vues multiples coordonnées.

3.2 Les vues multiples coordonnées

3.2.1 L'utilisation de vues multiples

Avant d'aller loin dans la compréhension des vues multiples coordonnées, il faut d'abord comprendre les vues multiples. Nous les définissons ici et nous cherchons à identifier leurs dimensions et quand il faut y avoir recours.

3.2.1.1 Les vues multiples

Wang Baldonado et *al.* (2000) définissent une vue unique comme étant un ensemble de données plus une spécification de la façon d'afficher visuellement ces données, sous forme textuelle ou graphique. À leur avis, les vues sont distinctes si elles permettent à l'utilisateur d'apprendre à propos de différents aspects de l'entité conceptuelle, par exemple en présentant différentes informations ou en mettant l'accent sur différents aspects de la même information. Partant de là, ils décrivent un système de vue multiple comme utilisant deux ou plusieurs de ces vues distinctes pour permettre

l'investigation d'une entité conceptuelle donnée. Ces vues peuvent être présentées de manière séquentielle ou simultanée. L'exemple qu'ils donnent est celui de *Microsoft PowerPoint* qui supporte plusieurs vues d'une présentation, la vue diapositive montrant individuellement chaque diapositive tandis que la vue trieuse de diapositives donne un aperçu de la présentation. Même si cet exemple n'est pas le plus illustratif, car se référant à des vues qui ne sont pas de même importance et qui ne sont pas systématiquement simultanées, il a le mérite de donner une certaine idée de la notion de vues multiples.

Selon North et Shneiderman, le besoin de multi-visualisation provient du fait que les utilisateurs ont souvent affaire à des quantités et des variétés d'information augmentant sans cesse, ce qui rend leurs tâches plus complexes et basées sur plusieurs sources d'information (North & Shneiderman 1997). Dans le même temps, ils travaillent sur des projets plus ambitieux demandant l'accès rapide à de grandes quantités d'information visuelle contenue dans plusieurs fenêtres. Ces fenêtres correspondent généralement à des vues présentant des aspects différents de l'information traitée. Selon Wang Baldonado et al. (2000), les vues peuvent différer par les données qu'elles affichent ou la représentation visuelle de ces données (une vue peut afficher un diagramme à barres tandis qu'une autre vue affiche un nuage de points, indépendamment du contenu représenté). En ce qui concerne les façons dont les données représentées par les vues peuvent différer, ils donnent trois exemples :

- Un ensemble de données peut être un sous-ensemble d'un autre ensemble de données. Si on prend l'exemple de la modélisation 3D, une vue peut montrer l'ensemble des cours des actions en bourse pour une période donnée, tandis qu'une autre vue se concentre sur les prix de l'action pour une compagnie spécifique durant la période considérée ;
- Un ensemble de données peut contenir des agrégats de valeurs individuelles d'un second ensemble de données. Par exemple, une vue peut montrer les coûts moyens pour les différents types d'hôtel d'une région donnée, pendant que l'autre vue montre la localisation de chacun de ces hôtels ;
- Des ensembles de données peuvent contenir des informations entièrement différentes. Par exemple, un système de conception assistée par ordinateur (CAO) d'une puce électronique peut montrer dans une vue un schéma représentant la structure logique du circuit intégré, et dans une autre vue la disposition graphique détaillée de la géométrie réelle du circuit à fabriquer.

3.2.1.2 Quand utiliser les vues multiples

Une question intéressante est de savoir quand l'on devrait avoir recours à des vues multiples. Pour répondre à cette question, Wang Baldonado et al. (2000) définissent quatre règles pour guider les concepteurs d'interfaces :

- La règle de la diversité : la règle de la diversité recommande l'utilisation de vues multiples « lorsqu'il y a une diversité d'attributs, de modèles, de profils utilisateurs, de niveaux d'abstraction, ou de genres ». Cela s'explique notamment par le fait que l'apport d'une vue unique pour représenter tous ces différents éléments ne saurait être optimal dans la mesure où elle risquerait sans doute de créer une surcharge cognitive pour l'utilisateur. En effet, ce dernier serait obligé de comprendre et d'assimiler trop d'information à la fois. Dans l'exemple de la simulation 4D, nous sommes bien dans ce

cas de diversité car nous avons vu plus haut (paragraphe 2.1.1.2) qu'elle gère à la fois les éléments de l'ouvrage à construire, la géométrie de ces éléments, les niveaux de détails, les dates d'exécution, les liens logiques entre les éléments, les liens entre les dates d'exécution, etc.

- La règle de la complémentarité : la règle de la décomposition recommande d'utiliser les vues multiples « lorsque différentes vues mettent en évidence des corrélations et/ou des disparités ». Dans ce cas, l'utilisation d'une vue unique pour percevoir ces corrélations ou disparités peut devenir très vite contre-productive et « cognitivement exigeants ». L'utilisation de plusieurs vues complémentaires peut ainsi s'avérer particulièrement utile. Pour illustrer cela, nous prenons l'exemple d'une simulation 4D réalisée par des étudiants de Master de l'université de Liège (Kubicki et *al.* 2012). Dans cet exemple (Figure 55), les étudiants ont voulu mettre graphiquement en exergue les relations fin-début auquel il est nécessaire de faire attention dans la réalisation des éléments de l'ouvrage à réaliser. La vue en haut à gauche montre l'ouvrage à une date donnée, avec en rouge, les éléments d'ouvrages en cours de réalisation (éléments d'ossature, façade). La vue en haut à droite montre l'ouvrage à la même date mais en zoomant sur les éléments d'ossature. La réalisation de ces éléments d'ossature est nécessaire avant le démarrage de la construction de la dalle partielle qui va s'y poser, tel que le montrent les vues du bas, représentant la séquence suivante du processus de construction.

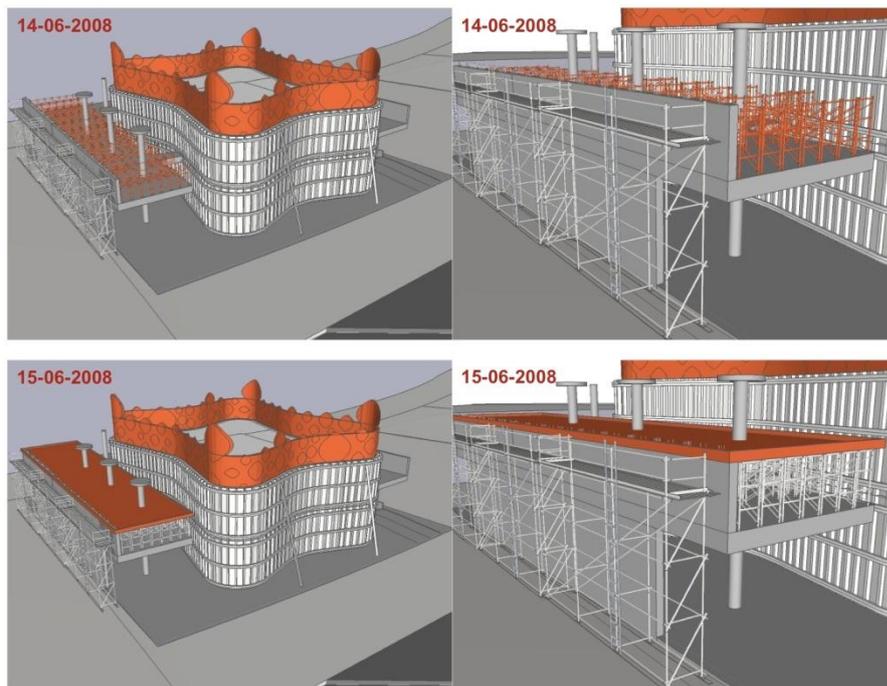


Figure 55 : Exemple de vues complémentaires dans une simulation 4D

- la règle de la décomposition : la règle de la décomposition recommande de « partitionner les données complexes en plusieurs vues pour créer des morceaux gérables et pour mettre de la perspicacité dans l'interaction entre les différentes dimensions ». Cela s'explique notamment par le fait qu'une vue unique complexe peut être cognitivement écrasante pour l'utilisateur. L'utilisation de vues multiples peut aider l'utilisateur à « diviser pour régner », aidant la mémoire en réduisant la quantité de

données nécessaire à la fois. Pour bien comprendre cette règle, nous prenons un autre exemple d'une simulation 4D réalisée par les étudiants de l'université de Liège (Kubicki et al. 2012). Il s'agit ici de rendre compte des activités en cours (affichées en rouge) à une date donnée, dans le cadre de la construction d'un gratte-ciel (Figure 56). Il faut noter qu'il s'agit d'un ouvrage qui s'étend sur une grande hauteur et pour lequel plusieurs éléments sont construits en parallèle. On voit bien que la vue du centre (représentant l'ouvrage dans son ensemble) permet assez mal de percevoir toutes ces activités et nécessiterait plusieurs interactions de l'utilisateur. La décomposition en plusieurs vues différentes (correspondant chacune à une activité de construction en cours) permet de mieux percevoir les éléments de l'ouvrage en cours de réalisation à la date donnée et aux différentes localisations (étages) dans le bâtiment.

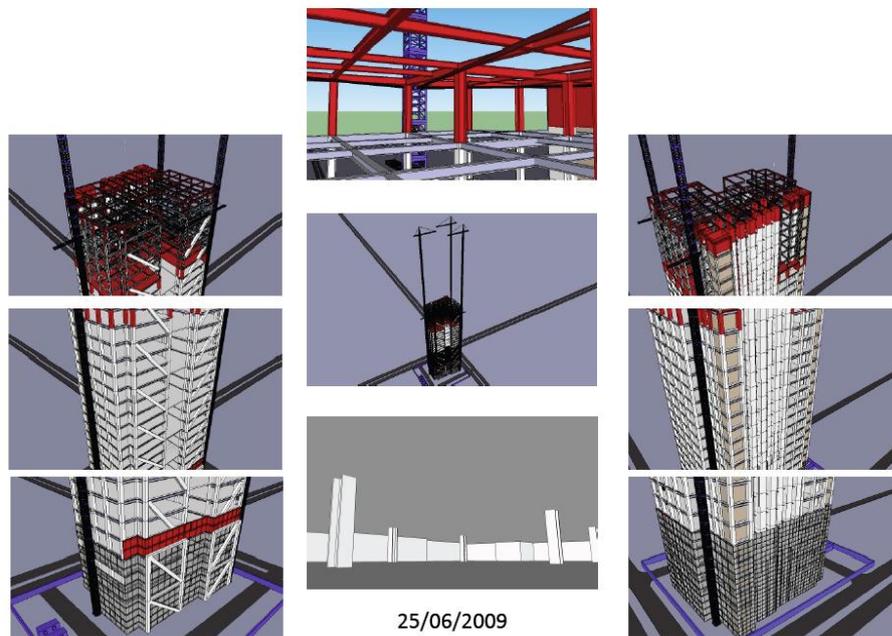


Figure 56 : Exemple de décomposition de vues (Wang Baldonado et al. 2000)

- La règle de la parcimonie : la règle de la parcimonie recommande tout simplement « d'utiliser les vues multiples de manière minimale ». Selon Wang Baldonado et al. (2000), une vue unique fournit à l'utilisateur un contexte stable pour l'analyse tandis que des vues multiples l'obligent à changer de contexte en changeant de vue, ce qui évidemment a un coût cognitif. De plus, il est important de garder à l'esprit que des vues multiples introduisent une complexité supplémentaire. Par conséquent, le concepteur doit être en mesure de justifier les coûts d'apprentissage de l'utilisateur et les coûts d'espace de calcul et d'affichage d'une vue additionnelle en faisant appel aux règles de la diversité, de la complémentarité et de la décomposition.

3.2.1.3 Les dimensions de la conception des vues multiples

Wang Baldonado et al. (2000) identifient trois dimensions fondamentales pour le processus de conception et l'utilisation des vues multiples. Ces dimensions concernent la sélection, la présentation et l'interaction.

La sélection consiste à identifier un ensemble de vues à utiliser de manière coordonnée pour supporter une tâche donnée de visualisation. Nous reviendrons plus loin sur la coordination des vues multiples. Mais il est important à cette étape de comprendre que certaines combinaisons de vues peuvent ne pas s'avérer intéressantes pour correspondre à la tâche de visualisation qu'elles sont supposées supporter.

Après la sélection de l'ensemble des vues, la question de leur présentation se pose alors. Selon Wang Baldonado et *al.* (2000), elles peuvent être présentées de manières séquentielle ou bien simultanée. Dans le cas où elles sont présentées simultanément, il devient nécessaire de s'interroger sur le choix de la meilleure configuration possible à l'écran.

La troisième étape est relative au choix des mécanismes d'interaction gérés par les vues. Chaque vue unique peut avoir ses mécanismes d'interaction propres pour permettre à l'utilisateur d'interagir ou de naviguer. Mais dans plusieurs cas, des données ou des tâches sont communes à plusieurs vues et il est intéressant de coordonner les interactions de manière à ce que les actions sur une vue puissent être propagées dans les autres.

Ceci nous emmène à aborder la question de la coordination des vues. Mais avant de le faire, il est important de bien comprendre comment il faut utiliser les vues multiples.

3.2.2 Les règles d'utilisation des vues multiples

En dehors des quatre règles présentées plus haut (diversité, complémentarité, décomposition, parcimonie), Wang Baldonado et *al.* (2000) ont proposé quatre autres règles pour assister les concepteurs d'interface dans la manière d'utiliser les vues multiples. Ces quatre règles sont celles de l'optimisation de la ressource espace/temps, de l'évidence, de la cohérence, et de la gestion de l'attention.

3.2.2.1 La règle de l'optimisation de la ressource espace/temps

La règle de l'optimisation de la ressource espace/temps recommande d'équilibrer les coûts spatial et temporel de la présentation de vues multiples, avec les bénéfices spatial et temporel de l'utilisation des vues. Selon Wang Baldonado et *al.* (2000), le concepteur doit décider très tôt si les vues multiples seront présentées côte à côte ou de manière séquentielle, car même si l'application peut permettre à l'utilisateur de décider par lui-même, un bon choix par défaut est toujours crucial. À cet effet, le concepteur doit prendre en compte l'espace et le temps dont dispose l'utilisateur, et l'espace et le temps nécessaires pour chaque vue. Bien que le calcul du coût d'espace soit relativement simple, il est souvent plus délicat de calculer le coût en temps dont certains aspects sont cachés. Parmi ces coûts cachés, l'on peut citer le temps nécessaire à un utilisateur pour passer du contexte d'une vue à celui d'une autre et le temps requis pour le calcul et la restitution d'une vue.

L'on pourrait se demander pourquoi ne pas afficher toutes les vues simultanément. À cette question, la règle de l'optimisation de la ressource espace/temps apporte deux raisons. Primo, il ne serait pas possible pour l'utilisateur de voir tous les graphiques à la fois et, bien que le défilement donne à l'utilisateur l'illusion que les graphiques apparaissent spatialement les uns près des autres, il est peu probable pour les utilisateurs de les voir en même temps (sur les écrans standards). La deuxième

raison tient du fait que les graphiques sont de plus en plus améliorés, ce qui demande plus de temps de téléchargement et de consommation de la ressource temps. En plus de ces deux raisons, la règle de décomposition en apporte une troisième : montrer en même temps toutes les vues entraînerait un encombrement et une surcharge d'information.

De manière pragmatique, l'application de cette règle conduira à des conclusions différentes pour différentes plates-formes. Ainsi, les vues séquentielles pourront être préférées à des vues côte à côte dans le cas de petits terminaux comme par exemple les plateformes mobiles (smartphones, etc.).

3.2.2.2 La règle de l'évidence

Partant du fait que discerner les relations entre les vues peut être une tâche difficile pour l'utilisateur, Wang Baldonado et *al.* (2000) proposent l'utilisation de signaux perceptuels pour rendre les relations entre les vues multiples plus évidentes. Selon eux, il existe plusieurs types de signaux perceptuels utilisables (surbrillance, arrangement spatial des vues, interaction couplée, etc.). Mais l'utilisation des signaux perceptuels doit tenir compte de certaines limites et subtilités que Wang Baldonado et *al.* (2000) illustrent de deux façons :

- la première concerne l'interaction couplée qui, du fait qu'elle introduit un certain nombre de complexités, devrait être prise en compte dès le début de la conception du système. Il s'agit d'un point particulièrement crucial pour les systèmes où l'utilisateur peut apporter des changements dans plus d'une vue visible, ou dans le cas de fonctions de couplage non triviales. Par exemple, les données de deux vues peuvent être des transformations non triviales les unes des autres, entraînant des questions sémantiques (quels objets de la vue A devraient être surlignés lorsque l'utilisateur balaie un objet dans la vue B correspondant à leur valeur moyenne ?). De plus, une fois que les questions liées à la sémantique ont été tranchées, les développeurs doivent faire attention à maintenir les informations nécessaires pour faire le mappage entre les objets dans toutes les vues.
- la deuxième illustration, selon Wang Baldonado et *al.*, concerne le fait qu'il est non seulement important d'utiliser les signaux perceptuels indiquant les relations entre les vues, mais qu'il est également important de s'assurer que les composants visuels et interactifs de l'interface ne se traduisent pas en « coup sauté ». En faisant le parallèle avec Philipsen (Philipsen 1994), ils rappellent que le choix de mauvais signaux perceptuels pourrait affecter la performance des utilisateurs. De plus, puisque selon si deux événements se produisent à moins de cent millisecondes l'un de l'autre, l'utilisateur a tendance à les percevoir comme liés de manière causale (Stuart K. Card et *al.* 1986), il est préférable que les changements propagés d'une vue à l'autre aient lieu dans un intervalle de cent millisecondes pour que l'utilisateur ne manque pas de reconnaître la relation entre les vues. Si les mises à jour rapides ne sont pas possibles en raison de limitations informatiques ou d'autres contraintes, les vues devraient être découplées ; et ce découplage mis en évidence à l'utilisateur. Le système pourrait par exemple griser la vue temporairement découplée. Il est également possible d'utiliser de petits symboles pour notifier à l'utilisateur que la vue n'est plus à jour ; il peut ainsi déclencher une mise à jour sur demande.

3.2.2.3 La règle de la cohérence

À travers cette règle, Wang Baldonado et *al.* (2000) proposent de rendre cohérentes les interfaces pour les vues multiples. Il s'agit également de rendre cohérents les états des vues multiples. La complexité supplémentaire introduite par l'utilisation de vues multiples doit être contrebalancée par une facilité d'apprentissage, facilitée par la cohérence. En effet, la cohérence rend les comparaisons plus faciles tandis que les incohérences des vues peuvent conduire à des déductions cognitives par l'utilisateur. En dehors des recommandations habituelles de cohérence des interfaces, cette règle met l'accent sur deux domaines spécifiques dans lesquels les systèmes de vue multiple devraient faire preuve de cohérence. Il s'agit de l'état du système et les capacités suggestives de l'interface.

L'état du système englobe à la fois l'ensemble de données et point de vue de l'utilisateur. Par exemple, si une vue montre une région particulière, une vue liée devrait montrer la même région. De même, si des objets sont mis en évidence dans une vue, les objets correspondants dans une vue associée devraient être aussi mis en évidence. Cette cohérence peut ne pas être souhaitable pour certaines applications parce que l'utilisateur souhaite utiliser des vues différentes pour préserver des états différents. En outre, la cohérence n'est pas toujours possible à réaliser et dans ces cas, la règle de l'évidence veut que le découplage soit clair.

En ce qui concerne la cohérence dans les capacités suggestives de l'interface, il s'agit de rendre les systèmes de vues multiples plus faciles d'apprentissage et d'utilisation. L'application de cette règle au concepteur de partitionner d'abord les vues du système en des classes d'équivalence en analysant leur fonctionnalité. Il faut ensuite s'assurer que toutes les vues de la même classe d'équivalence aient les mêmes capacités suggestives. Wang Baldonado et *al.* (2000) donnent l'exemple de l'outil calendrier du Palm Pilot dont les vues *Jour*, *Semaine* et *Mois* appartiennent à une classe d'équivalence parce que fournissant des fonctions similaires, mais à des niveaux de granularité différents. Dans les vues *Semaine* et *Mois*, une petite icône est utilisée pour indiquer un événement. Dans la vue *Semaine*, en tapotant sur cette icône une infobulle est affichée pour décrire l'événement. Dans la vue *Mois*, l'icône est trop petite pour être tapotée séparément. En tapotant la région de l'icône, on ouvre la vue *Jour* à la date de l'événement. Ces changements de contexte inattendus peuvent être déconcertants pour l'utilisateur.

3.2.2.4 La règle de la gestion de l'attention

La gestion de l'attention consiste à utiliser des techniques perceptuelles pour attirer l'attention de l'utilisateur sur la bonne vue au bon moment. Selon Wang Baldonado et *al.*, lorsque surviennent des événements nécessitant une attention de l'utilisateur, des techniques perceptuelles peuvent diriger l'utilisateur vers une vue saillante. Un défi important dans un système de vues multiples est donc de faire en sorte que l'attention de l'utilisateur soit au bon endroit au bon moment. Cela exige à la fois de guider l'utilisateur vers la vue actuellement importante et de s'assurer qu'il ne soit pas distrait de cette vue. Les techniques perceptuelles ont une valeur inestimable pour l'atteinte de ces objectifs dans la conception. Parmi ces techniques, l'on peut citer les animations, le son, le surlignage, le mouvement, etc.

3.2.3 Coordination des vues multiples

3.2.3.1 Les vues multiples coordonnées

Selon Roberts l'utilisation de vues multiples se justifie par deux besoins importants (Roberts 2007). D'un côté, les utilisateurs ont besoin de visualiser des données compliquées et complexes, d'explorer et d'étudier des réalités difficilement repérables. Ces études complexes exigent des utilisateurs le recours à différents scénarios afin de comparer des visualisations générées à partir de différents ensembles de données, d'agréger et d'exploiter les données, de fusionner parfois les données de plusieurs ensembles de données pour générer une nouvelle information, et d'être capables de revenir à une précédente version. D'un autre côté, les utilisateurs peuvent être si familiers aux techniques qu'ils utilisent qu'ils en arrivent à rater la richesse des données fondamentales. Dans ce cas, l'utilisation d'un environnement de visualisation permettant l'examen de différentes représentations leur permet de percevoir des relations et des réalités nouvelles à propos de leurs données. Selon lui, leurs interactions dans ces environnements devraient également être gérées de manière à coordonner automatiquement les opérations entre les vues. Malheureusement, il arrive très souvent que les vues multiples soient traitées comme étant indépendantes et isolées, laissant à l'utilisateur le travail fastidieux de manipulation d'une fenêtre à la fois, même si ces fenêtres séparées sont liées par le contenu ou par les tâches (North & Shneiderman 1997).

Selon North et Shneiderman, la coordination des vues multiples est une stratégie qui a prouvé son efficacité dans la conception d'interfaces utilisateurs pour l'exploration de l'information (North & Shneiderman 1997). Cette stratégie utilise, de manière coopérative pour l'accomplissement d'une tâche unique, deux ou plusieurs vues séparées contenant des informations liées. Dans ce cas, des portions similaires ou différentes de l'information peuvent être affichées par des vues différentes et ces vues étroitement coordonnées de sorte que l'interaction sur des composantes d'une vue se propage vers les composantes correspondantes dans les autres vues (North et al. 2002). Nous parlerons alors de vues multiples coordonnées. La coordination garantit que les changements dans une vue sont propagés dans toutes les autres, maintenant ainsi la cohérence des données analysées (North & Shneiderman 2000). Wang Baldonado et al. (2000) identifient deux techniques pour y parvenir : l'asservissement (*slaving*) et la liaison (*linking*). Dans le cas de l'asservissement, les mouvements dans une vue sont automatiquement propagés dans les autres vues, tandis que la liaison connecte des données d'une vue à des données d'une autre vue. Dans le *brushing* par exemple qui est un type spécifique de liaison, l'utilisateur met en évidence des items d'une vue et les items correspondants dans une autre vue sont mis en évidence par le système. D'autres types de liaison existent comme par exemple les liaisons spatiale et temporelle dans une séquence animée de vues.

Pour North et Shneiderman (2000), un intérêt important des vues multiples coordonnées réside dans la flexibilité qu'elles permettent, en ce qui concerne les données, la sélection d'un type de mode de représentation pour un ensemble donné de données, et la définition de caractéristiques de coordination. Leur utilisation a pris tellement d'importance dans le domaine scientifique de la

visualisation et l'exploration des données, qu'une conférence internationale a été mise en place en 2003 pour en discuter les avancées⁴.

3.2.3.2 Questionnements liés à la coordination des vues multiples

Boukhelifa et Rodgers ont identifié trois défis importants liés à l'utilisation de vues multiples coordonnées (Boukhelifa & Rodgers 2003). À cause de la nature des vues multiples, il n'est pas toujours possible d'appliquer directement aux autres vues, les actions sur une vue. Ils donnent l'exemple de deux vues tridimensionnelles sur lesquelles il peut être utile de faire une rotation simultanée ; mais si chacune des vues utilise une projection mathématique différente, il sera nécessaire d'opérer une « traduction » pour convertir les interactions de l'utilisateur sur une vue dans un format approprié pour l'autre vue. Cependant, des coordinations peuvent être réalisables et s'avérer non utiles, et d'autres coordinations impossibles à réaliser. Et, à ce niveau d'abstraction, il est possible de se baser sur l'utilisateur pour juger de l'utilité d'une coordination particulière. Ensuite, il y a plusieurs questions liées à la conception et à l'interface utilisateur que le concepteur peut souhaiter poser. Par exemple, si les vues multiples représentent un historique visuel, est-il faisable ou pertinent de faire la coordination entre les variations passées de l'exploration ? De plus, tout est-il coordonné ou bien des aspects de quelques fenêtres uniquement le sont ? Dans ce dernier cas, il est intéressant de chercher à savoir qui décide, entre l'utilisateur et le système. Le troisième défi est relatif à la manière dont le système représente visuellement et notifie à l'utilisateur ce qui est actuellement coordonné. Ceci bien entendu pose plusieurs problèmes de visualisation.

Partant de ces questionnements et dans la logique de pouvoir proposer un modèle pour la coordination des vues multiples, Boukhelifa & Rodgers (2003) étudient les outils de coordination de vues et font ressortir quelques notions importantes dans la coordination des vues multiples. Parmi ces notions, nous pouvons citer :

- les entités de coordination : les entités de coordination détaillent ce qui est actuellement coordonné, par exemple les aspects réels de la fenêtre, de la vue, des données, de l'enregistrement, etc. ;
- le type : le type de coordination détermine la méthode par laquelle les entités sont liées. Par exemple, une coordination simple peut être faite en utilisant des types primitifs (*float*, *integer*, etc.) tandis que d'autres coordinations peuvent utiliser des structures de données plus complexes. Une traduction peut être nécessaire si les entités utilisent des types différents ;
- la chronologie (durée de vie et ordonnancement) : le temps pendant lequel les entités sont coordonnées est régi par la durée de vie. La coordination peut être permanente pour une certaine action, ou déterminée par une portée. Elle peut également être synchrone, asynchrone, réactive ou proactive.
- la portée : la portée détermine aussi bien la connexion globale/locale que la durée de vie des liaisons. Une portée globale signifierait que n'importe quelles entités pourraient être connectées. Une portée locale va restreindre les liaisons à une région locale. La portée peut également restreindre la durée de vie.

⁴ International Conference on Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization

- la granularité des liaisons : plusieurs entités peuvent être connectées entre elles via une variété de liaisons. La granularité détermine : le nombre d'entités dans une coordination $\{2...n\}$, le nombre de vues dans une coordination $\{1...n\}$, et le nombre de liaisons à travers lesquels une entité contribue à la coordination $\{0...n\}$.
- l'initialisation : l'initialisation détermine comment la coordination est créée (automatiquement, spécifique à un utilisateur, prévue d'une manière, etc.).
- la mise à jour : la coordination des vues nécessite une mise à jour dynamique des données. Cependant, des utilisations conflictuelles peuvent apparaître surtout lorsqu'il s'agit de vues représentant des historiques visuels. Généralement, dans un paradigme de flux de données, les modules en aval reflètent toujours l'information en amont. Cependant, il peut être prudent que, parfois, certains points de vue deviennent hors de la synchronisation : de telle sorte qu'ils reflètent une époque antérieure de l'histoire.
- la réalisation (réalisation de liaison, contrôle de l'utilisateur) : cette notion se rapporte à la manière dont l'utilisateur se rend compte de la liaison. À cet effet, il est possible d'utiliser des lignes explicites (par exemple, le *Spiral calendar visualizer* (Mackinlay et al. 1994)) ou des mécanismes formels de layout.

Même si ces différentes notions donnent une bonne idée des aspects à prendre en considération dans la coordination de vues multiples, elles sont très théoriques et les liaisons entre elles ne sont pas clairement visibles. Pour avoir une idée plus pratique des concepts liés à la coordination des vues, il nous semble donc nécessaire d'étudier quelques modèles de coordination de vues multiples.

3.2.3.3 Les modèles et guidelines pour la coordination des vues multiples

Des modèles et guidelines existent pour la coordination de vues multiples. Parmi les plus significatifs, nous pouvons citer la taxonomie de coordination de fenêtres multiples, proposée par North et Shneiderman (1997) et le modèle de vues multiples coordonnées pour la visualisation exploratoire proposée par Boukhelifa et Rodgers (2003).

La taxonomie proposée par North et Shneiderman (Figure 57) organise les stratégies de coordination en une matrice 2x3. Le principe de base consiste à définir les fenêtres en deux composants majeurs à savoir une **vue** et une collection d'**items**, chacune étant associée à une action basique de l'utilisateur :

- La sélection d'items : les fenêtres contiennent des collections d'items d'information de l'un des sept types de données (caractères, mots, paragraphes de textes unidimensionnels, de pixels, régions d'une image 2D, ou nœuds d'une arborescence, etc.). Dans une manipulation directe, l'action de base de l'utilisateur sur les items est la sélection.
- La navigation dans les vues : La vue d'une fenêtre permet une visualisation de la collection d'items. Puisque la vue pourrait ne montrer qu'une portion de collections larges, les utilisateurs naviguent dans la vue pour voir les autres parties. Différents types de navigation correspondent aux différents types de données (défilement, panoramique, zoom, pivotement, rotation, etc.).

La coordination d'une paire de fenêtres couple fermement l'une de ces actions dans la première fenêtre à une autre dans la seconde fenêtre.

La première dimension de la taxonomie classe les coordinations entre deux vues en trois combinaisons possibles :

1. La sélection d'items entraîne la sélection d'items ;
2. La navigation dans les vues entraîne la navigation dans les vues ;
3. La sélection d'items entraîne la navigation dans les vues.

La deuxième dimension fait une classification selon le fait que les collections d'items contenus dans la paire de fenêtres coordonnées sont identiques ou différentes :

- a) Les mêmes collections d'items d'information dans chaque fenêtre ;
- b) Différentes collections d'items d'information dans chaque vue.

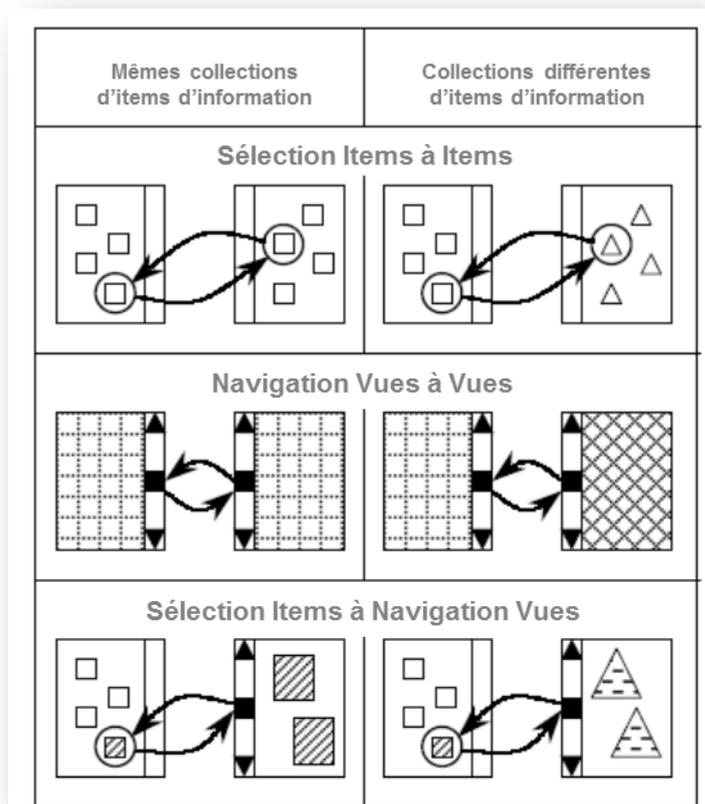


Figure 57 : Taxonomie 2X3 pour la coordination des fenêtres multiples de North et Shneiderman (North & Shneiderman 1997)

Le modèle abstrait proposé par Boukhelifa et Rodgers (2003) pour la coordination des vues comprend les « objets de coordination » qui gèrent les combinaisons d'entités (les paramètres, par exemple) contrôlant des aspects des vues liées. Un objet de coordination unique est associé à chaque coordination séparée dans le système de sorte qu'une vue sera dite coordonnée si elle partage un

objet commun de coordination. Tous les objets de coordination pour un système de visualisation sont détenus dans un « espace de coordination » (Figure 58).

Les vues coordonnées ont besoin de définir une fonction de traduction (par exemple, $f_{1,1}$ et $f_{1,2}$ pour l'objet de coordination 1 appliqué aux vues 1 et 2 sur la Figure 58) de l'objet commun de coordination aux paramètres de la vue liée. Les vues doivent également s'enregistrer pour être informées d'un événement de notification lorsqu'un objet de coordination change. Si un événement se produit, ce qui pourrait être typiquement une action engagée par un utilisateur dans l'une des vues liées, il modifie l'objet de coordination, qui envoie une notification à toutes les vues liées enregistrées. L'enregistrement peut dépendre d'une portée qui peut être globale (n'importe quelles entités pourraient être connectées) ou locale (va restreindre les liaisons à une région locale). Les vues qui ont été notifiées d'une modification utilisent par conséquent l'information fournie par l'objet de coordination via leur fonction de traduction pour générer une nouvelle vue. Selon ses auteurs, un avantage de ce modèle réside dans sa nature dynamique, puisque les vues peuvent être ajoutées et supprimées sans que les autres vues ayant accès au même objet de coordination n'aient nécessairement connaissance de cette activité.

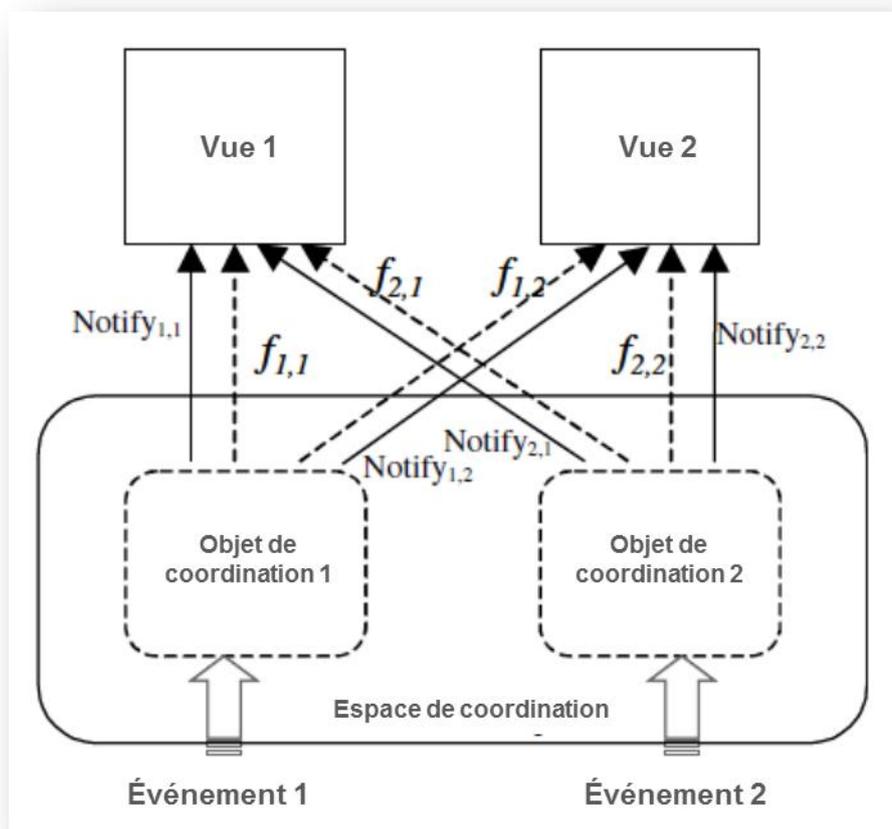


Figure 58 : Modèle abstrait de coordination en visualisation exploratoire de Boukhelifa et Rodgers (Boukhelifa & Rodgers 2003)

Par ailleurs, Boukhelifa et Rodgers présentent un prototype de vues multiples baptisé CViews et montrant plusieurs vues coordonnées (Figure 59). En utilisant un diagramme UML, ils décrivent conceptuellement le principe de coordination des vues dans CViews (Figure 60).

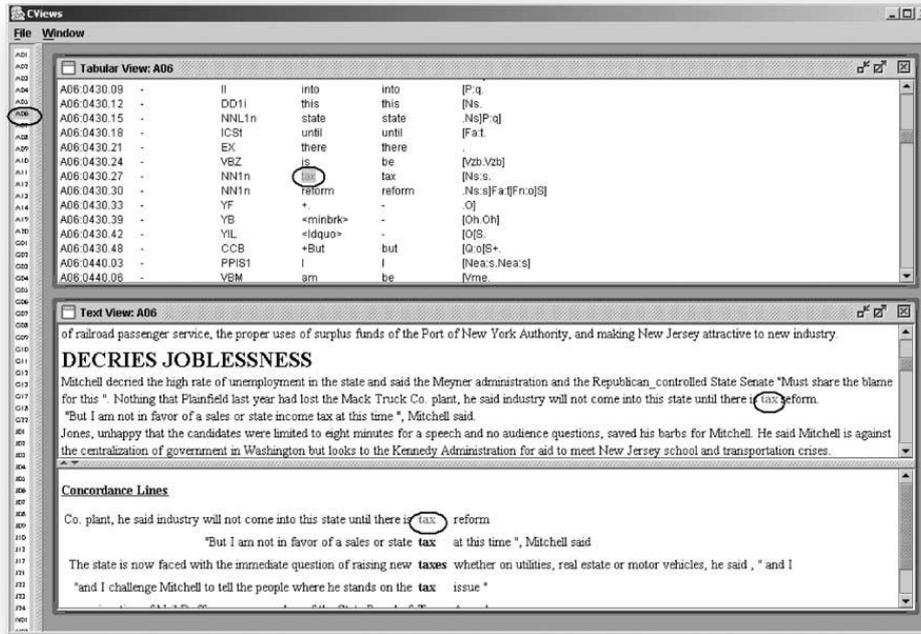


Figure 59 : Prototype CViews montrant plusieurs vues coordonnées (Boukhelifa & Rodgers 2003)

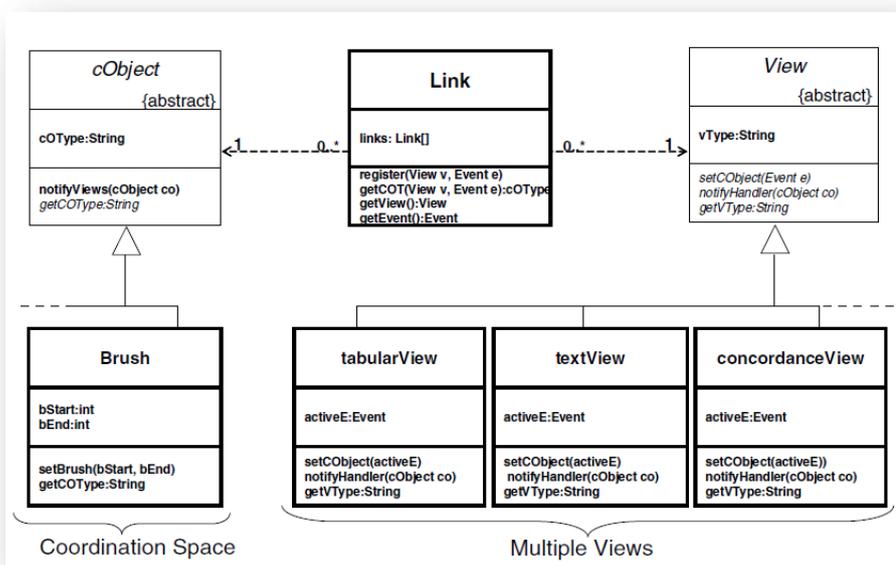


Figure 60 : Modèle conceptuel de la coordination des vues dans le prototype CViews (Boukhelifa & Rodgers 2003)

◆ Retenons, avant d’aller plus loin :

- 1) La multi-visualisation est utilisée quand les acteurs ont besoin de plusieurs fenêtres correspondant à des vues présentant des aspects différents de l’information traitée.
- 2) Des règles existent pour guider l’opportunité (diversité, complémentarité, décomposition, parcimonie) et la manière (optimisation espace/temps, évidence, cohérence, gestion de l’attention) d’utiliser les vues multiples.
- 3) La coordination des vues multiples est importante et permet d’afficher des portions similaires ou différentes de l’information par des vues différentes et de coordonner ces vues étroitement de sorte que l’interaction sur des composantes d’une vue se propage vers les composantes correspondantes dans les autres vues.
- 4) Des modèles et recommandations existent pour guider la coordination des vues multiples, mais ne proposent pas un formalisme générique pour la description de systèmes de vues multiples coordonnées.

3.3 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons abordé un certain nombre de théories de visualisation de l’information, utiles à la compréhension de notre sujet de recherche. La visualisation est une activité cognitive faisant appel à des représentations visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation mentale de l’objet représenté. La visualisation de l’information, comme domaine de recherche, s’intéresse à la représentation et à la visualisation de données abstraites tandis que la visualisation scientifique traite des objets physiques et la géovisualisation étudie la visualisation géographique. La sémantique graphique en visualisation de l’information identifie la nature des données et les structures de représentation. Elle étudie les éléments graphiques et les attributs rétiniens de manière à améliorer la perception, par l’utilisation notamment de propriétés préattentives dans la création des représentations visuelles utilisées dans les vues. Parmi les critères permettant d’évaluer la qualité des représentations visuelles, figurent l’excellence graphique, l’intégrité graphique, le ratio encre-données et l’esthétique.

En fonction de notre problématique spécifique exposée dans les chapitres précédents (conception de vues nD adaptées), nous avons compris qu’une vue utilise des représentations visuelles pour afficher des contenus correspondant à des besoins d’information de l’utilisateur de la vue. Une représentation visuelle peut se décrire par sa structure ainsi que les éléments graphiques et les attributs rétiniens qu’elle utilise. Quant au contenu, il correspond à un besoin d’information de l’utilisateur et peut être décrit notamment par le format des données. Plusieurs techniques de représentation peuvent correspondre à un même format de données et l’identification du besoin métier réel de l’utilisateur peut permettre de faire un choix judicieux. La compréhension du besoin métier, intègre des questionnements tels que le format des données manipulées, le nombre de dimensions des données et le type d’interaction requis. Il est également judicieux d’utiliser au mieux

les propriétés graphiques afin d'améliorer la perception et la cognition des utilisateurs. En fonction du type d'interaction associée à la représentation, il est possible d'avoir des vues statique, transformable ou manipulable. Un exemple de vue statique est une image imprimée sur papier ou affichée sur un écran d'ordinateur et non modifiable par l'utilisateur. Une vue transformable est une vue dont l'utilisateur peut contrôler le processus de modification et de transformation des données. Une vue manipulable est une vue pour laquelle l'utilisateur peut contrôler et modifier des paramètres régulant la génération, comme par exemple zoomer sur un détail ou faire une rotation sur une image 3D. Mais un principe d'interaction se caractérise également par son niveau d'interactivité (interaction manuelle, interaction mécanisée, interaction enseignable, interaction guidable, interaction automatique) et son mode (continu, par étapes, passif, composite). Toutes ces notions seront très importantes dans notre proposition, car elles nous serviront de base pour modéliser le concept de vue.

Lorsque les utilisateurs ont besoin de deux ou plusieurs vues complémentaires pour satisfaire entièrement leur besoin d'information, le concept de « vues multiples » est utilisé. L'étude de ce concept est fort utile, car, rappelons-le, notre problématique concerne l'utilisation des simulations nD qui, généralement, mettent en œuvre plusieurs vues complémentaires. Dans la simulation 4D par exemple, une vue 3D est associée à une vue Planning. Les vues multiples utilisent deux ou plusieurs vues distinctes pour répondre à une entité conceptuelle unique. Dans la plupart des cas, il existe des contenus communs aux différentes vues. Il est donc intéressant, voire nécessaire, de coordonner les opérations entre les vues, de manière à obtenir des « vues multiples coordonnées ». Les quatre premières règles proposées par Wang Baldonado et *al.* (diversité, complémentarité, décomposition, parcimonie) montrent les conditions dans lesquelles les vues multiples coordonnées peuvent être utilisées. La coordination des vues est un enjeu essentiel dans l'utilisation de vues multiples et deux techniques sont généralement utilisées à cet effet : l'asservissement (*slaving*) et la liaison (*linking*). Une taxonomie ainsi qu'un modèle existent dans la littérature pour assister les concepteurs dans la coordination des vues multiples, dans le cadre de la visualisation exploratoire. Nous montrerons plus loin comment les simulations nD peuvent être considérées comme des systèmes de vues multiples coordonnées.

Dans le cas d'une utilisation collaborative des vues, le besoin métier des utilisateurs ne se limite évidemment pas aux différents questionnements énumérés ci-dessus. Il doit tenir compte d'autres aspects relevant de la visualisation collaborative. Ainsi, nous explorerons dans le prochain chapitre les théories de Visualisation Collaborative après avoir, pour des raisons de compréhension, abordé le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO).

**TRAVAIL COLLABORATIF ASSISTÉ PAR ORDINATEUR
ET VISUALISATION COLLABORATIVE**



*“Individual commitment to a group effort - that is what makes
a team work, a company work, a society work, a civilization work.”*

Vince Lombardi

4 Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur et Visualisation Collaborative

Le recul théorique effectué dans le présent chapitre nous permet de repositionner le travail collaboratif dans un contexte plus large et d'explorer la discipline scientifique traitant du Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO). Nous abordons notamment les notions de base, les outils d'assistance au TCAO ainsi que les approches classiques et celles récemment introduites pour décrire et assister le travail collectif. Nous aborderons également la Visualisation Collaborative telle qu'elle est définie actuellement dans la littérature, de manière à mieux positionner notre problématique par rapport aux théories existantes.

4.1 Le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO)

4.1.1 Définitions, approches et dimensions

À travers cette partie, nous allons passer en revue les théories du TCAO. Nous montrerons notamment que les approches classiques consistent à classifier et à permettre le choix d'outils en fonction des besoins des utilisateurs. Ce qui amène la plupart du temps à une somme d'outils qui, en réalité, ne couvrent pas les besoins de tous les acteurs et qui sont loin d'être adaptés aux besoins réels des utilisateurs.

4.1.1.1 Les collecticiels et le TCAO

Ellis et *al.* (1991) définissent les collecticiels comme étant des « systèmes informatiques qui assistent des groupes de personnes engagées dans une tâche commune (ou un but commun) et qui fournissent une interface vers un environnement partagé ». Pour Mills (2003), la famille des collecticiels inclut les programmes de partage, les logiciels de vidéoconférence, les logiciels de suivi de changement dans un document, les outils de messagerie électronique, et les logiciels d'assistance au visionnage collaboratif de pages Web. Il précise qu'un collecticiel est un « logiciel relié à des

réseaux informatiques de manière à permettre à des personnes de travailler de manière coopérative » (Mills 2003).

Selon Lyytinen et Ngwenyama, le travail collaboratif peut être défini comme étant « des pratiques coopératives s'appuyant sur des ensembles de règles/ressources spécifiques qui sont conjointement produites et reproduites à travers des interactions sociales et économiques partagées et récurrentes entre des individus » (Lyytinen & Ngwenyama 1992). Ces auteurs proposent de distinguer le travail coopératif des autres types de travail, par la forme et le contenu du produit, et la distribution spatiale, temporelle et sociale des tâches réalisées. Selon eux, le travail coopératif peut généralement être caractérisé par des interdépendances complexes et intenses d'activités qui dépendent d'une compréhension partagée, par les acteurs, du processus de travail et du contexte social. Les relations entre les acteurs y sont formées « à travers une structuration planifiée et une action discursive délibérée, contrairement à la liaison spontanée comme on en voit dans un marché ». Cette mise au point nous pousse, évidemment, à identifier les principales dimensions du TCAO.

4.1.1.2 Les dimensions clés du TCAO

Mills a identifié dix dimensions clés pour les systèmes de TCAO (Mills 2003). Il s'agit essentiellement du temps, de l'espace, de la taille du groupe, du style d'interaction, du contexte, de l'infrastructure, de la mobilité du collaborateur, de la confidentialité, de la sélection du participant et de l'extensibilité (voir Tableau 8). Mills apporte les précisions suivantes :

- le temps : les concepteurs de collecticiels doivent faire face à une dichotomie importante concernant la dimension temporelle parce qu'il est essentiel pour eux de savoir si la collaboration se déroule de manière simultanée ou non. On parlera de coopération synchrone pour le cas où les participants travaillent simultanément et de coopération asynchrone dans le cas contraire.
- l'espace : à travers la dimension spatiale, il s'agit de déterminer si les collaborateurs individuels sont physiquement localisés (ou pas) au même endroit (salle, auditorium, etc.). Il faut également envisager le cas (plus compliqué) de collaboration virtuelle entre plusieurs sites distants de collaborateurs situés au même endroit.
- la taille du groupe : la taille du groupe permet de déterminer si le système est conçu pour assister la collaboration d'une petite équipe, d'un département, d'une entreprise, ou d'un large public.
- le style d'interaction : il est important de savoir si les interactions du groupe sont impromptues, planifiées à l'avance, ou les deux à la fois.
- le contexte : le contexte selon Mills se rapporte au fait que les membres du groupe participent à plusieurs collaborations distinctes ou s'ils ont tendance à participer à une seule collaboration (ou peu). Le sens que Mills donne au contexte ne correspond pas tout à fait à notre acception de ce mot, que nous avons déjà développé dans le troisième chapitre. Nous retiendrons donc la définition précédemment proposée et ferons référence aux trois contextes identifiés par Kubicki (2006) (le contexte acteur, le contexte coopératif et le contexte utilisateur).
- l'infrastructure : l'infrastructure peut être constituée par des plateformes informatiques homogènes ad hoc ou des systèmes informatiques hétérogènes existants.

- la mobilité du collaborateur : il s'agit de déterminer si les collaborateurs changeront de localisation, ou bien s'ils demeureront à des endroits fixes tout au long de la collaboration.
- La confidentialité : la confidentialité est une dimension très importante pour l'utilisateur d'un collectif. Il s'agit notamment de savoir quelle information est disponible pour qui, mais également de déterminer le(s) responsable(s) des versions de l'information.
- la sélection des participants : Les participants peuvent être affectés par d'autres membres déjà présents dans le groupe ou par une autorité externe. Ils peuvent se rechercher et se sélectionner à partir d'une population plus large.
- l'extensibilité : L'extensibilité détermine si le système de TCAO définit les fonctionnalités complètes pour les collaborateurs ou si ces derniers peuvent étendre les fonctionnalités pour répondre à des changements de besoins.

Tableau 8 : Les dix dimensions clés des systèmes de TCAO (adapté de [Mills 2003])

Dimension	Valeurs limites
Temps	Totalement synchrone vs. Entièrement asynchrone
Espace	Participants tous co-localisé vs. Participants entièrement distribués
Taille du groupe	Petite équipe vs. Large public
Style d'interaction	Workflow assigné vs. Interaction ad hoc
Contexte	Collaboration unique par participant vs. Nombre illimité de collaborations par participant
Infrastructure	Entièrement homogène vs. Entièrement hétérogène
Mobilité du collaborateur	Tous dans un emplacement fixe vs. Tous mobiles
Confidentialité	Assignée par autorité vs. Contrôlée par le participant
Sélection du participant	Assignée par autorité vs. Libre pour tous
Extensibilité	Aucune vs. Toutes les fonctionnalités sont définies par les participants

Une fois les dimensions clés identifiées, nous allons nous intéresser aux systèmes de TCAO actuels avant d'étudier comment ils sont classifiés et proposés aux utilisateurs pour assister leurs besoins.

4.1.1.3 Systèmes et approches du TCAO

Les systèmes de TCAO ont évolué avec l'avancée de la technologie et plusieurs recensements en ont été proposés à travers le temps. L'un des tout premiers auteurs à tenter de les recenser est sans doute Johansen (Johansen 1988). En se plaçant du point de vue des besoins des utilisateurs, il a identifié dix-sept approches de systèmes d'assistance informatique au travail de groupe. Ces approches vont de la facilitation de réunion face à face, à l'intégration de participants non humains à des réunions d'équipe (agents intelligents), en passant par les conférences audio ou vidéo assistées par ordinateur. Quelques années plus tard, Ellis et *al.* ont proposé une liste des systèmes de TCAO, d'un point de vue du niveau d'application. Cette liste recense :

- les systèmes de messagerie : exemples les plus familiers de collectif, les systèmes de TCAO permettent l'échange asynchrone de messages textuels entre des groupes d'utilisateurs.
- les éditeurs multi-utilisateurs : les éditeurs multi-utilisateurs donnent la possibilité à plusieurs membres d'un groupe de composer et d'éditer conjointement un même document. En général, les éditeurs multi-utilisateurs autorisent à la fois plusieurs accès à la lecture à plusieurs segments du document, mais ils autorisent seulement un seul accès à l'écriture à la fois par segment.
- les systèmes de support à la décision de groupe (GDSS) et les salles de réunion électronique : le but des systèmes de support à la décision de groupe est d'améliorer la productivité des réunions de prise de décision (accélération de la prise de décision ou amélioration de la qualité de la décision), en fournissant des installations pour l'exploration de problèmes non structurés, pour le vote, pour la génération d'idées, etc. Ces systèmes sont pour la plupart installés comme des salles de réunion électronique intégrant des équipements audiovisuels, des stations de travail en réseau, des dispositifs d'affichage, etc.
- les conférences informatiques, incluant les conférences informatiques en temps réel, les téléconférences informatiques, et la vidéoconférence informatique.
- les agents intelligents : les agents intelligents sont les participants non humains qui sont responsables de tâches spécifiques. Par exemple, dans le cas de jeux vidéo multi-joueurs, des participants virtuels peuvent être automatiquement générés si le nombre minimal de joueurs n'est pas atteint.
- les systèmes de coordination : les systèmes de coordination veillent à l'intégration et à l'ajustement harmonieux des activités individuelles pour l'atteinte de l'objectif commun.

Certains types de systèmes manquent dans cette liste. On n'y voit par exemple pas les systèmes de support à la mobilité des acteurs, qui ont pris une grande importance ces dernières années. Ce recensement est donc loin d'être exhaustif, car comme nous l'avons dit, les approches de TCAO ne cessent d'évoluer avec la technologie. L'on parle à cet effet de co-évolutivité pour traduire le fait que « les systèmes coopératifs doivent être continûment évolutifs, sans l'être toutefois de façon autonome ou auto-adaptative, car ils doivent rendre compte, de manière consciente, des évolutions des besoins, des attitudes et des compétences des usagers, individuellement ou collectivement » (Benali et *al.* 2002). Il est donc difficile de proposer une liste exhaustive et actualisée des systèmes de TCAO. Par contre, la classification de ces systèmes permet de disposer de catégories de systèmes adaptés à des besoins précis des utilisateurs.

4.1.2 Classifications des systèmes de TCAO

Plusieurs classifications des systèmes de TCAO ont été proposées dans la littérature. L'intérêt principal de ces classifications est, non seulement d'être capable de catégoriser les systèmes et de les mettre en correspondance avec des contextes ou des besoins particuliers. Plusieurs classifications existent et nous évoquerons dans cette partie les plus reconnues dans la communauté scientifique.

4.1.2.1 La classification fonctionnelle

L'une des classifications les plus couramment utilisées pour regrouper les systèmes de TCAO est la classification fonctionnelle. Elle est connue comme étant le trèfle fonctionnel du collectif (Salber et al. 1995) présentant trois espaces représentant les fonctionnalités typiques des collectifs : la production, la coordination et la communication (Figure 61). Selon Salber et al. (1995), l'espace de production « décrit les concepts qui motivent l'action de groupe, qui dénotent l'œuvre tangible commune, mais aussi l'espace privé de chaque utilisateur comme dans un système mono-utilisateur ». L'espace de coordination quant à lui définit la dynamique des acteurs, de leurs responsabilités et des relations temporelles entre leurs tâches et activités. L'espace de communication est relatif aux mécanismes assistant le partage d'information entre les acteurs.

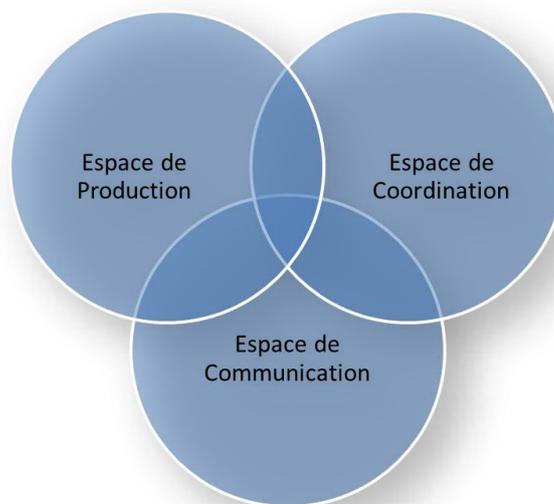


Figure 61 : Le trèfle fonctionnel du collectif (Salber et al. 1995)

Depuis, plusieurs variantes du trèfle fonctionnel ont été proposées. Celle de David par exemple (voir Figure 62) introduit un espace de conversation pour regrouper les systèmes de communication ne produisant pas de l'information persistante, contrairement à l'espace classique de communication dont la caractéristique importante est sa capacité de mémoriser les échanges (David 2001).

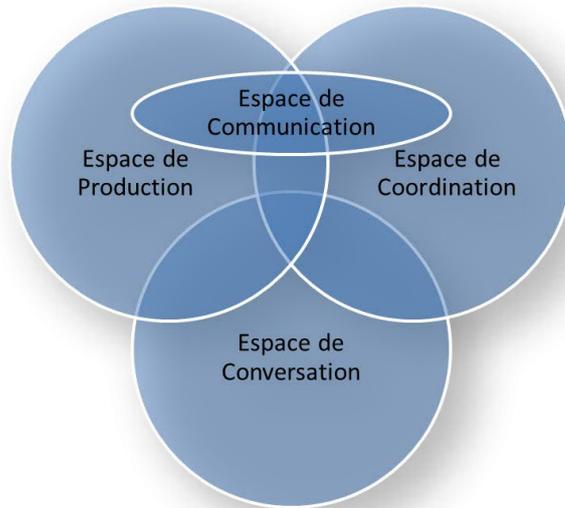


Figure 62 : La version du trèfle fonctionnel proposée par David (David 2001)

4.1.2.2 La classification spatio-temporelle

La classification spatio-temporelle est aussi très souvent utilisée. Certains auteurs attribuent la proposition de la classification spatio-temporelle à DeSanctis et Gallupe (DeSanctis & Gallupe 1987), ce qui n'est pas tout à fait exact. Si ces derniers ont effectivement été parmi les premiers à proposer une classification des systèmes de TCAO, leur travail, partant du constat évident que le groupe peut être de taille variable et que les membres peuvent être face-à-face ou dispersés géographiquement, propose une matrice de classification des groupes en fonction de la proximité des membres (dispersion spatiale) et de la taille du groupe (Figure 63).

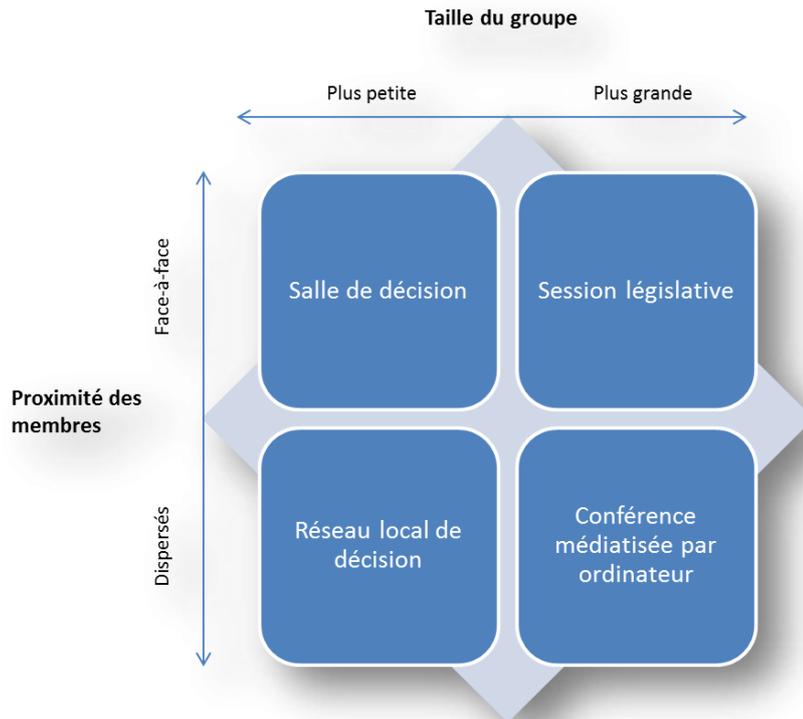


Figure 63 : Matrice de classification des groupes de DeSanctis et Gallupe [adapté de (DeSanctis & Gallupe 1987)]

Nous devons la classification spatio-temporelle des acteurs à Johansen (1988). Il s'agissait de classer les approches par rapport à la dispersion spatio-temporelle des participants en utilisant une matrice pour comparer le lieu et le temps de la coopération. D'un côté, il distingue les réunions synchrones (même moment) où les participants sont simultanément présents, et les communications asynchrones où les participants communiquent selon leurs propres calendriers en mode « enregistrement-réémission ». D'un autre côté, on a les réunions face-à-face (même lieu) et les réunions électroniques (lieux différents). L'association des deux paramètres (temps et espace) permet de distinguer quatre situations dans lesquelles un système informatique de support devra proposer des fonctionnalités adaptées (Figure 64).

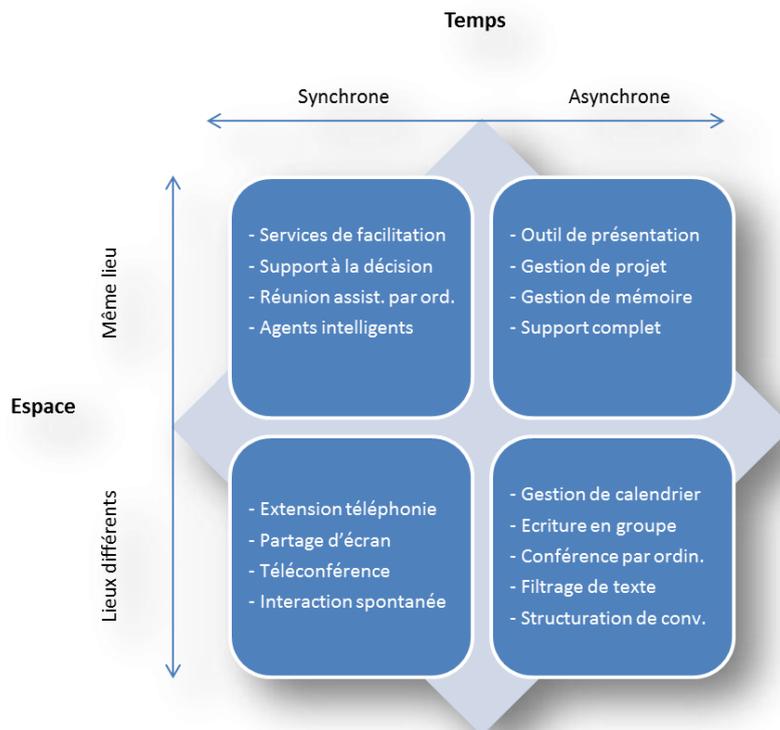


Figure 64 : Catégorisation des approches suivant la dispersion spatio-temporelle des participants [adapté de (Johansen 1988)]

Selon Grudin (1994), une classification spatio-temporelle doit prendre en compte le fait que l'activité peut avoir lieu :

- dans un endroit unique ;
- à partir d'endroits différents connus des participants ;
- à partir d'endroits différents qui ne sont pas tous connus des participants ;
- en temps réels ;
- à des moments différents, mais fortement prévisibles ou contraints ;
- à des moments différents et imprévisibles.

Partant de ce constat, il propose un raffinement de la matrice de classification spatio-temporelle de Johansen (1988). Cette matrice identifie trois états possibles pour le temps (synchrone, asynchrone prévisible, asynchrone imprévisible) et trois états pour le lieu (même lieu, lieux différents prévisibles, lieux différents imprévisibles [Tableau 9]).

Tableau 9 : Classification spatio-temporelle de Grudin [adapté de (Grudin 1994)]

		Temps		
		Même	Différent mais prévisible	Différent et imprévisible
Lieu	Même	Facilitation de réunion	Travail décalé	Salles d'équipe
	Différent mais prévisible	Téléconférence, Vidéoconférence	E-mail	Écriture collaborative
	Différent et imprévisible	Séminaires multicast interactifs	Groupes de communication électronique (forums)	Workflow

4.1.2.3 La classification par codes

Penichet et *al.* (2007) proposent qu'au lieu de classer les systèmes en les distribuant dans les tableaux, il serait sans doute plus pertinent de montrer les relations entre :

- une fonction, ou une application ou un système, et
- les caractéristiques spatio-temporelles, et
- les fonctionnalités typiques du TCAO à savoir le partage d'information, la communication et la coordination.

Ainsi, on ne restreint pas la possibilité pour un outil, d'avoir plusieurs caractéristiques en même temps. Penichet et *al.* (2007) ont identifié neuf caractéristiques spatio-temporelles. En effet, contrairement à ce que pourrait laisser supposer le Tableau 10, les états 1, 2, 3, 4, 8, 12 ne sont factuellement pas possibles.

Tableau 10 : Possibilités spatio-temporelles (Penichet et al. 2007)

Type	Temps		Espace	
	Synchrone Non = 0 Oui = 1	Asynchrone Non = 0 Oui = 1	Même Non = 0 Oui = 1	Différent Non = 0 Oui = 1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

En ce qui concerne les fonctionnalités typiques du TCAO (coordination, communication, partage d'information), sept possibilités ont été identifiées et présentées dans le Tableau 11. À noter que l'état X n'est pas possible.

Tableau 11 : Possibilités en fonction des caractéristiques du TCAO (Penichet et al. 2007)

Type	Fonctionnalité TCAO		
	Partage d'info Non = 0 ; Oui = 1	Communication Non = 0 ; Oui = 1	Coordination Non = 0 ; Oui = 1
X	0	0	0
A	0	0	1
B	0	1	0
C	0	1	1
D	1	0	0
E	1	0	1
F	1	1	0
G	1	1	1

En mettant ensemble les caractéristiques spatio-temporelles et les fonctionnalités du TCAO, il est possible d'obtenir un tableau de classification non exclusive, montrant clairement le type de service auquel l'on a affaire.

Tableau 12 : Classification non exclusive proposée par Penichet et al. (Penichet et al. 2007)

Type	Outil	Fonctionnalité TCAO			Temps / Espace			
		Partage d'Info Non = 0 ; Oui = 1	Communication Non = 0 ; Oui = 1	Coordination Non = 0 ; Oui = 1	Synchrone Non = 0 ; Oui = 1	Asynchrone Non = 0 ; Oui = 1	Même espace Non = 0 ; Oui = 1	Espace diff. Non = 0 ; Oui = 1
B-5	Fax	0	1	0	0	1	0	1
B-5	E-mail	0	1	0	0	1	0	1
B-9	Système de téléphonie IP	0	1	0	1	0	0	1
B-9	Chat	0	1	0	1	0	0	1
F-7	Gestion de documents	1	1	0	0	1	1	1
F-7	Nouvelles	1	1	0	0	1	1	1
F-7	Forum	1	1	0	0	1	1	1
F-7	Discussions	1	1	0	0	1	1	1
G-7	Mécanisme d'approbation	1	1	1	0	1	1	1
C-7	Calendrier de groupe	0	1	1	0	1	1	1
C-7	Planification partagée	0	1	1	0	1	1	1
A-7	Workflow	0	0	1	0	1	1	1
C-7	Gestion d'événement	0	1	1	0	1	1	1
C-7	Agenda	0	1	1	0	1	1	1
D-11	Co-navigateur	1	0	0	1	0	1	1
D-11	Tableau blanc partagé	1	0	0	1	0	1	1
B-7	Système de notification	0	1	0	0	1	1	1
F-13	Système de présentation	1	1	0	1	1	0	1
G-11	GDSS	1	1	1	1	0	1	1
G-15	BSCW	1	1	1	1	1	1	1
F-7	Sharepoint	1	1	0	0	1	1	1
F-10	Salle de réunion	1	1	0	1	0	1	0
F-9	Vidéoconférence	1	1	0	1	0	0	1

Il est possible, au lieu de devoir refaire un tableau de classification à chaque fois, d'utiliser le code associé au type d'application. Par exemple, le fax et l'e-mail sont considérés comme étant de type B-5, en référence à l'état B du Tableau 11 et à l'état 5 du Tableau 10. La lecture est assez difficile avec cette classification, car, du point de vue visuel, elle n'est pas très expressive. Par contre, elle a l'intérêt de présenter une liste de "services" intégrables dans des outils d'appui à la collaboration. Il s'agit donc, non plus de proposer des types d'outils figés pour supporter le travail collaboratif, mais d'identifier des services correspondant aux besoins des utilisateurs et de les intégrer de manière à proposer des outils appropriés à ces besoins. Cette approche correspond à l'architecture orientée service (SOA) qui tend à se développer de plus en plus (Erl 2004; Perrey & Lycett 2003).

Ces différentes classifications ne permettent pas de décrire tous les besoins du TCAO, ce qui explique le recours à de nouvelles approches.

4.1.3 Nouvelles approches de description du travail collaboratif

Malgré les classifications évoquées plus haut, décrire une activité collaborative et comprendre exactement les besoins des participants demeure somme toute un travail difficile pour les concepteurs d'outils de TCAO. Ceci est dû au fait que les équipes doivent faire face à des décisions de plus en plus complexes, surtout pour de domaines métiers où la collaboration fait appel à des configurations très complexes (comme la construction [Kubicki 2006]). Nous verrons ici quelques nouvelles approches de descriptions du travail collaboratif et du contexte de collaboration.

4.1.3.1 Les personas de collaboration

Traditionnellement, les *personas* sont des modèles d'utilisateurs représentés par des individus humains spécifiques (Cooper & Reimann 2003) et utilisés dans la conception d'interfaces homme-machine. Il s'agit de personnages fictifs représentant des individus réalistes (Pruitt & Grudin 2003) dont les modèles de comportement (but, aptitudes, intérêts) proviennent d'observations et d'interviews de vrais utilisateurs (ou clients) du produit ; les variables comportementales constituant les axes à travers lesquels l'utilisation du produit est segmentée (Giboin 2011).

Les *personas de collaboration* sont des descriptions empiriquement dérivées de groupes fictifs de personnes ayant des qualités, des buts et des besoins spécifiques, réalisés en collaborant les uns avec les autres (Yarosh et al. 2010). Selon Yarosh et al. (2010), les personas de collaboration peuvent être utilisés pour :

- aider les utilisateurs dans le choix d'outils de collaboration appropriés ; et
- concevoir de nouveaux outils de collaboration correspondant mieux aux besoins de groupes typiques.

L'objectif principal de l'utilisation de personas de collaboration est de concevoir des outils de collaboration pour des types spécifiques de collaboration (Yarosh et al. 2010). Giboin (2011) a récemment réalisé un historique du concept de personas collectifs et a constaté qu'il faut remonter en 2004 pour en trouver une origine, avec la notion de *personas de groupe* introduite par Kuniavsky (2004) et ses étudiants, pour décrire des groupes de personnes (plutôt que des utilisateurs individuels) utilisant simultanément une technologie. Il y a eu ensuite d'autres concepts, comme les *communitas* (Giboin 2006), avant les *personas de collaboration* (Yarosh et al. 2010). Ces concepts ont en commun l'objectif de caractérisation de groupes afin de concevoir des outils de collaboration plus appropriés. À cet effet, ils partagent, selon Giboin (Giboin 2011), certaines notions telles que :

- le nom du persona : terme utilisé pour désigner le persona, et qui est relatif au collectif considéré comme étant une entité ou à l'activité réalisée par le collectif ;
- la définition du persona : les personas sont définis comme appartenant à un collectif ou comme étant une entité composée d'individus ;
- les variables du persona : les variables utilisées sont des variables des personas individuels transposées aux personas collectifs ou des variables venant de modèles existants pour décrire les collectifs.
- les collectifs considérés : les travaux se concentrent soit sur des collectifs spécifiques, soit sur un large éventail de collectifs.
- le réalisme des personas : le niveau de réalisme des personas collectifs en tant qu'entité varie en fonction des travaux, mais n'atteint le niveau de réalisme des personas individuels, dans aucun d'entre eux.

<p>Nom du groupe : Equipe chargée des relations entre Rainbow Bank – Global Corp</p> <p>Objectifs du groupe</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maintenir une relation positive entre Global Corp (le fournisseur) et Rainbow Bank (le client). - S'assurer que les besoins de Rainbow Bank auprès de Global Corp sont pris en compte. - Identifier de nouvelles solutions, ou des mises à jour des solutions existantes, que Global Corp peut offrir à Rainbow Bank pour améliorer ses activités (opportunité pour de nouvelles ventes à Rainbow Bank). <p>Style de travail du groupe</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jeff va régulièrement demander à Sophie les besoins de Rainbow Bank et l'informer des nouvelles offres pertinentes de Global Corp. - Marie va sporadiquement contacter Quan avec des questions techniques à propos de la technology de Global Corp. - Jeff et Quan vont régulièrement communiquer de manière informelle pour se tenir informés des pistes de vente. - Lorsque de nouvelles opportunités décollent, Jeff et Quan vont se rencontrer pour décider de les prolonger et planifier la mise en place d'une équipe dynamique pour les poursuivre. <p>Besoins de communication</p> <ul style="list-style-type: none"> - Garder une chaîne de communication ouverte entre le client et le fournisseur. - Maintenir une connaissance des changements chez le client qui ouvrent des opportunités de vente.
--

Figure 65 : Extraits d'un exemple de persona de collaboration [adapté de (Tara Matthews et al. 2011)]

4.1.3.2 *Eléments de description du contexte de l'activité collective*

Yarosh et al. (2010) identifient quatre phases génériques d'une coopération durant lesquelles les besoins peuvent varier :

- le démarrage qui consiste à former l'équipe, à fixer les objectifs de collaboration, à s'entendre sur les conventions, à mettre en place d'éventuels outils ;
- la planification au cours de laquelle un programme ou un plan de travail est établi. Cette phase peut impliquer un brainstorming, la formation de sous-groupes, l'attribution des tâches, l'ordonnancement des activités, etc. ;
- l'exécution consistant à réaliser le travail nécessaire pour atteindre les objectifs ; et
- le rapport incluant le partage des statuts intermédiaires et des résultats finaux avec les participants, la livraison des livrables, etc.

Ils ont également recensé quelques « **qualités** » affectant la manière dont les individus travaillent ensemble et, par conséquent, les outils dont ils pourraient avoir besoin pour assister la collaboration. Ces qualités sont (voir Figure 66) :

- la durée de vie (courte durée de vie ou longue durée de vie) ;
- l'élément constant pour les équipes à longue durée de vie (l'équipe ou l'objectif) ;
- le facteur de motivation (intérêt partagé ou objectif partagé) ;
- la taille de l'équipe (petite ou grande) ;
- le style de management de l'équipe (ajustement mutuel ou existence d'un leader désigné) ;
- le degré de dépendance entre les membres (interdépendants ou indépendants) ;

- l'existence de sous-groupes (pas de sous-groupe ou existence de plusieurs sous-groupes).

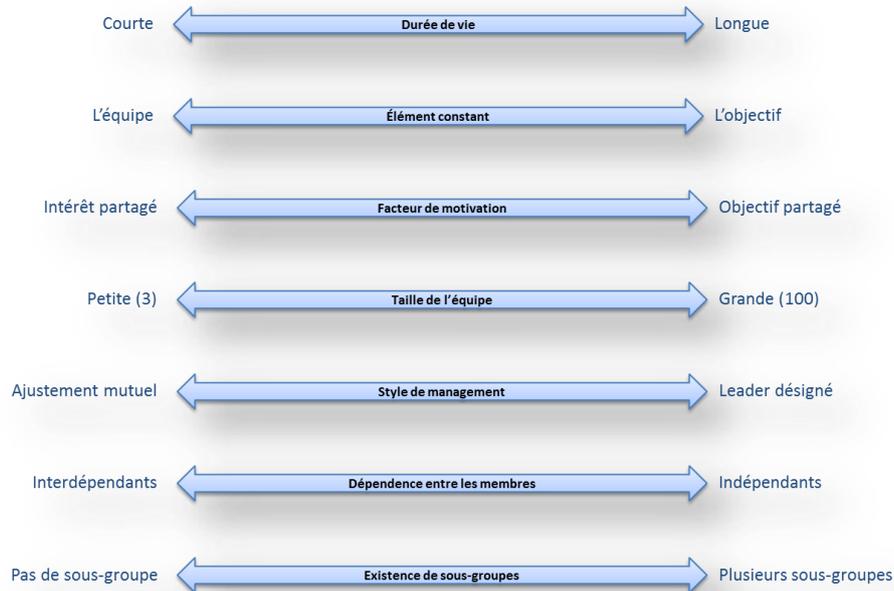


Figure 66 : Liste des qualités des collaborations [adapté de (Yarosh et al. 2010)]

Il faut noter que la description proposée pour le style de management (voir exemple sur la Figure 65), même si elle offre l'avantage d'être ouverte et large, semble limitée par sa faible expressivité, car elle n'est pas tout à fait structurée. Nous lui préférons celle de Kubicki (2006) que nous présentons plus bas (5.1.2.2) et qui fait clairement ressortir trois mécanismes de coordination (hiérarchique, adhocratique, transversale). Il faut également dire que les qualités proposées par Yarosh (2010) correspondent somme toute au déroulement normal d'un projet. Elles lui ont notamment permis de proposer une première classification des types de collaboration et les personas de collaboration correspondants.

4.1.3.3 Différents types de collaboration

Un peu plus récemment, Matthews et al. (2011) se sont basés sur le principe des personas collaboratif pour proposer six différents types de collaboration. Pour ce faire, ils ont d'abord identifié quatre attributs principaux permettant de différencier les comportements spécifiques à la collaboration. Ces attributs sont le but, le personnel, le style de travail, et le style de leadership. Le but peut être orienté objectif, intérêt, ou relation. Il peut être principal ou secondaire pour les participants en fonction de leurs responsabilités. Quant au personnel, il peut être stable ou dynamique. En ce qui concerne le style de travail, il peut s'agir de travail en commun, de co-création, de communication autour des relations, ou de partage d'information. Le style de leadership peut être démocratique ou impliquer la désignation d'un ou de plusieurs leaders.

Six types de collaboration ont été proposés : l'équipe de projet dynamique, l'équipe de projet stable, le comité, le groupe basé sur une relation client-fournisseur, la communauté, et les relations professionnelles (voir Tableau 13).

Tableau 13 : Les types de collaboration et leurs dimensions distinctives (Matthews et al. 2011)

	But	Personnel	Style de travail	Leadership
Équipe de projet dynamique	Livrable principal	Dynamique	Travail en équipe et Co-création	Leaders désignés
Équipe de projet stable	Livrable principal	Stable	Travail en équipe et Co-création	Leaders désignés
Relation client-fournisseur	Relation principale	Stable	Accent mis sur la communication	Leaders désignés
Comité	Livrable secondaire	Stable	Travail en équipe et Co-création	Démocratique
Communauté	Intérêt/rôle secondaire	Stable et/ou Dynamique	Accent mis sur la communication	Leaders désignés
Relations professionnelles	Relation secondaire	Dynamique	Accent mis sur la communication	N/A

Une **équipe de projet dynamique** est un groupe de personnes, dont certains membres restent les mêmes, mais dont la plupart des membres vont et viennent durant la vie du projet, travaillant en étroite collaboration pour réaliser un livrable commun qui est l'objectif principal du travail des membres (Matthews et al. 2011).

Une **équipe de projet stable** est un groupe de personnes, dont la plupart des membres restent les mêmes, travaillant en étroite collaboration pour réaliser un livrable commun qui est l'objectif principal du travail des membres (Matthews et al. 2011).

Un **comité** est un groupe de personnes travaillant en étroite collaboration pour la réalisation d'un livrable commun qui est secondaire à l'objectif principal de la plupart des membres (Matthews et al. 2011).

Un **groupe basé sur une relation client-fournisseur** est un groupe stable de client et de fournisseur qui communiquent de manière continue pour s'assurer que le fournisseur respecte les besoins du client (Matthews et al. 2011). Il existe plusieurs applications évidentes de ce type de collaboration dans le secteur de la construction.

Une **communauté** est un groupe de personnes, ayant des fonctions similaires ou des intérêts partagés, qui se mettent ensemble pour échanger de la connaissance, de l'information, des bonnes pratiques, et éventuellement déclencher de nouvelles collaborations (Matthews et al. 2011).

Les **relations professionnelles** se concentrent sur la communication entre deux individus, généralement avec un minimum de formalité et de structure. Les objectifs communs pour les relations professionnelles comprennent le mentorat, la recherche de collaborateurs, la construction de réputation, et/ou la recherche de réponses ou de commentaires à propos d'une question donnée (Matthews et *al.* 2011).

◆ **Retenons, avant d'aller plus loin :**

- 1) Différentes classifications existent pour catégoriser les systèmes et outils de TCAO.
- 2) Ces classifications permettent de proposer des systèmes ou outils correspondant à différentes situations de travail collectif.
- 3) Les dimensions utilisées par ces classifications ne permettent pas d'intégrer le contexte de l'activité collective dans l'évaluation des besoins.
- 4) De nouvelles approches de description du travail collectif nous permettent d'étendre la description du contexte de l'activité collective proposée par Kubicki (2006).
- 5) Par rapport à notre problématique, il est aussi important d'explorer le domaine de la visualisation collaborative.

4.2 La visualisation collaborative

Dans cette partie, nous aborderons le domaine scientifique de la Visualisation Collaborative. Nous verrons que la notion de visualisation collaborative ici se rapporte presque essentiellement à l'utilisation partagée de représentations visuelles. Cela ne concerne donc qu'un aspect de notre problématique, car rappelons-le, ce qui nous intéresse est, en plus de la visualisation collaborative, la visualisation d'un contexte collaboratif. Nous jugeons quand même très bénéfique d'étudier les théories de Visualisation Collaborative car certaines d'entre elles pourraient constituer des bases intéressantes pour la proposition de services de visualisation adaptés.

4.2.1 Définitions et principaux concepts

4.2.1.1 Définition

Après le chapitre précédent sur la Visualisation et la première partie du présent chapitre à propos du Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur, il apparaît assez évident que la visualisation collaborative se situe à la frontière de ces deux domaines scientifiques. Ainsi, certains auteurs (Wood et *al.* 1995) ont même parlé de Visualisation Collaborative Assistée par Ordinateur sans vraiment aller très loin dans la conceptualisation. Selon Johnson, le terme « visualisation collaborative » se rapporte à un sous-ensemble d'applications de TCAO dans lequel le contrôle sur les paramètres ou les produits de

la visualisation est partagée (Johnson 1998). Pour Raje et *al.* (1998), la visualisation collaborative améliore la visualisation traditionnelle en mettant ensemble plusieurs experts de manière à ce que chacun d'eux puisse contribuer au but commun de compréhension de l'objet, du phénomène ou des données étudiés. Il s'agit donc de permettre à des utilisateurs séparés d'accéder à un environnement virtuel partagé, de visualiser et de manipuler des ensembles de données pour la résolution de problèmes, sans devoir se déplacer physiquement (Li et *al.* 2006). La définition qui nous semble la plus complète est celle proposée plus récemment par Isenberg et *al.* (2011) selon qui la visualisation collaborative est l'utilisation partagée de représentations visuelles (interactives) assistées par ordinateur de données par plus d'une personne dans le but commun de contribuer à des activités conjointes de traitement d'information. De l'avis même des auteurs, cette définition se base sur la définition de la visualisation (voir chapitre précédent) augmentée par l'accent mis sur l'utilisation partagée de représentations visuelles pouvant prendre la forme de consultation conjointe, d'interaction avec les représentations, de discussion autour d'elles, ou de leur interprétation.

Raje et *al.* (1998) pensent qu'en raison de la nature du processus de visualisation collaborative, certaines fonctionnalités devraient se retrouver dans tous les systèmes développés à cet effet. Ces fonctionnalités sont :

- une prise en charge de multiples utilisateurs et de machines hétérogènes pouvant être ou non géographiquement distribuées ;
- un mécanisme de contrôle concourant tel que tous les utilisateurs puissent exprimer leurs points de vue clairement et de manière équitable ;
- une interface conviviale, vu que les participants à une session collaborative sont généralement des experts métiers, avec moins d'expérience informatique ;
- un processus d'authentification pour éviter des accès malicieux à des données importantes ;
- une capacité à stocker/récupérer les résultats des sessions de collaboration ainsi que les transcriptions.

Une remarque essentielle à faire ici concerne le fait que la notion d'adaptabilité n'est pas du tout citée. Cela ne veut pas dire que cette notion n'est pas du tout prise en compte, car comme nous le verrons au point 4.2.1.3, les modèles de références existant dans le domaine de la Visualisation Collaborative permettent notamment de proposer, à deux ou plusieurs utilisateurs, des rendus différents du même ensemble d'information.

4.2.1.2 Situations de visualisation collaborative

Si, selon Isenberg et *al.* (2011), la plupart des recherches concernant la visualisation collaborative mettent l'accent sur les environnements virtuels distribués, il faut rappeler que le TCAO concerne des dispersions spatiales aussi bien co-localisées que distribuées. La visualisation collaborative peut donc se faire avec des utilisateurs situés au même endroit ou dispersés géographiquement. La collaboration peut également être synchrone ou asynchrone. En se basant sur les théories de TCAO, Isenberg et *al.* (2011) proposent la Figure 67 qui montre différentes situations de visualisation collaborative catégorisées suivant la matrice spatio-temporelle. Les salles de classe, les salles de réunion, les musées ou encore les espaces de laboratoire donnent lieu à de la visualisation collaborative synchrone et co-localisée. Les travaux par quarts comme dans les hôpitaux donnent lieu

à de la visualisation collaborative co-localisée mais asynchrone. Un exemple typique de visualisation collaborative synchrone et distribuée est la vidéoconférence, tandis que les discussions par e-mail, les analyses de données via le web font appel à de la visualisation collaborative asynchrone et distribuée.

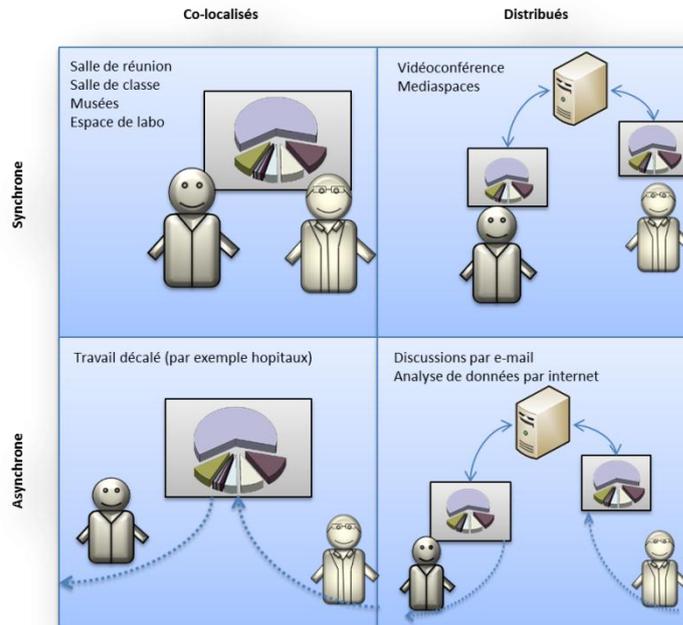


Figure 67 : Situations de visualisation collaborative suivant la matrice spatio-temporelle [adapté de (Isenberg et al. 2011)]

Mais la matrice spatio-temporelle n'est pas la seule façon de catégoriser les situations de visualisation collaborative. Selon Isenberg et al. (2011), une autre catégorisation intéressante concerne le niveau d'engagement que les équipes ont avec le système de visualisation. En fonction du niveau d'interaction des utilisateurs, différents types de systèmes sont proposés pour supporter la visualisation collaborative (Isenberg et al. 2011) :

- Consultation : le besoin de visualisation collaborative peut se limiter à la consultation de visualisations statiques ou animées sans possibilité d'interaction ou d'annotation. C'est le cas des systèmes de présentation tels que PowerPoint, ou des outils de vidéoconférence. Ces situations de consultation se produisent par exemple dans les salles de classe ou dans les réunions, avec un présentateur qui explique, enseigne, ou résume l'information à un groupe en utilisant un support PowerPoint. Le but de ce groupe peut être d'apprendre, de discuter, d'interpréter, ou de former des décisions à partir d'un ensemble présélectionné d'information et de vues.
- Interaction/Exploration : les personnes partageant un outil de visualisation interactif, qu'ils soient co-localisés ou géographiquement distribués, peuvent avoir besoin de choisir et de sélectionner des vues alternatives pour l'exploration, l'analyse, la discussion, et l'interprétation des données. À ce niveau d'engagement, le but est souvent de couvrir et d'explorer davantage d'aspects différents des données, de tenir compte d'interprétations alternatives, et de discuter des données dans un contexte visuel plus large.

- Partage/Création : de plus en plus de sites proposent aux utilisateurs de créer, télécharger et partager de nouveaux ensembles de données et de visualisations, dans le but de sensibiliser à une question donnée. Un exemple typique est *Many Eyes*⁵, le système de partage de visualisations proposé par IBM Research.

4.2.1.3 Modèle de référence

Dans le but de distinguer et de décrire d'une manière commune les différents modes de visualisation collaborative, Wood et *al.* (1995) ont proposé un modèle de référence pour la visualisation collaborative assistée par ordinateur. À cet effet, ils se basent sur les trois principales étapes du modèle proposé par Haber et McNabb (Haber & McNabb 1990) pour décrire les systèmes de visualisation. Ces étapes sont le filtrage, la cartographie visuelle et le rendu. Le filtrage consiste selon eux à prendre des données provenant d'un processus d'entrée et à les raffiner, par exemple, pour interpoler d'une grille non structurée à une grille régulière. La cartographie visuelle des données filtrées les convertit en une représentation géométrique, comme une surface ou une iso-surface. Le rendu génère une image visible à partir de l'information géométrique.

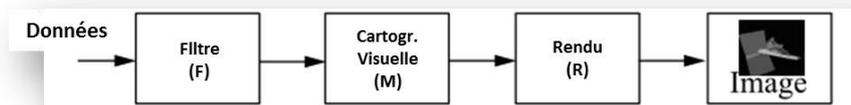


Figure 68 : Le pipeline de visualisation de Haber et McNabb tel que synthétisé par Wood et *al.* (Wood et *al.* 1995)

Pour la réalisation du modèle de référence, Wood et *al.* (1995) ont examiné plusieurs exemples de travaux de visualisation collaborative, incluant le partage complet d'une application de visualisation et le partage sélectif d'une application de visualisation. Ils ont ainsi proposé une version étendue du modèle de Haber et McNabb permettant d'avoir des points intermédiaires d'import et d'export pour les données et l'information de contrôle (Figure 69). Ce nouveau modèle se concentre au niveau des données et du contrôle, plutôt qu'au niveau des utilisateurs, donnant lieu à un paradigme général pour la visualisation collaborative. Il est possible d'injecter des données ou des informations de contrôle à chaque étape d'un pipeline complet ou partiel afin de le faire fonctionner de manière collaborative et d'exporter les données dans le but de partager le résultat. Les informations de contrôle provenant d'un pipeline peuvent également être exportées dans un autre pipeline de manière à synchroniser la collaboration.

⁵ [www-958.ibm.com], (page consultée le 30 juin 2012).

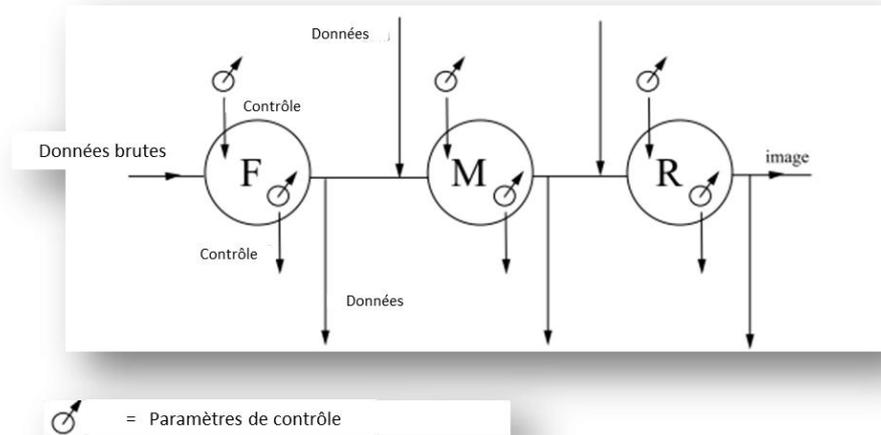


Figure 69 : Version étendue du modèle de Habber et McNabb, proposée par Wood et al. pour la visualisation collaborative (Wood et al. 1995)

Chaque participant est modélisé comme ayant son pipeline propre ou son pipeline partiel qui, dans certains cas, pourrait consister en seulement une étape de rendu avec des données importées depuis l'étape de cartographie visuelle d'un autre participant. La Figure 70 montre le pipeline de l'utilisateur B acceptant l'information de géométrie de l'utilisateur A et chacun la visionnant de manière indépendante. La Figure 71 montre les mêmes données en train d'être partagées pendant que les deux utilisateurs synchronisent également leurs vues en échangeant de l'information de contrôle depuis leur processus de rendu.

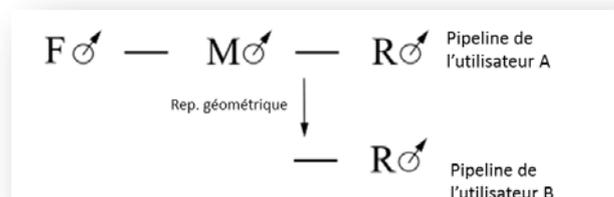


Figure 70 : Les utilisateurs A et B visionnent la même donnée de différentes façons (Wood et al. 1995)

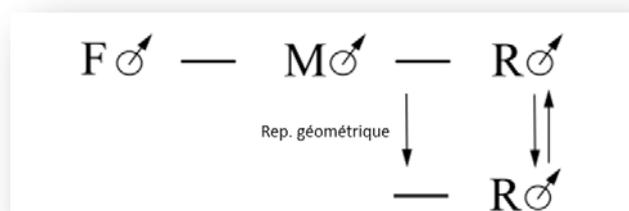


Figure 71 : Les utilisateurs A et B synchronisent leurs vues (Wood et al. 1995)

Selon Wood et *al.* (1995), le modèle proposé permet également de résoudre facilement la question des données publiques ou privées. À cet effet, ils donnent l'exemple de deux utilisateurs A et B collaborant sur un processus de cartographie visuelle et qui peuvent procéder de deux manières différentes. La première possibilité consiste à exporter les données filtrées du pipeline de l'utilisateur A dans l'étape de cartographie de B, puis d'échanger l'information de contrôle (Figure 72). Mais si les données filtrées doivent demeurer privées à A, l'alternative est d'échanger l'information de contrôle à l'étape de cartographie visuelle, mais d'exporter alors la représentation géométrique (Figure 73). L'étape de cartographie visuelle de B consisterait dans ce cas en un processus « fantôme » pouvant générer les paramètres de contrôle appropriés pour le processus de cartographie de A.

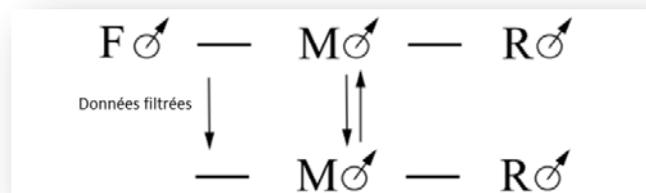


Figure 72 : Les utilisateurs A et B collaborent à l'étape de la cartographie visuelle (données publiques) (Wood et *al.* 1995)

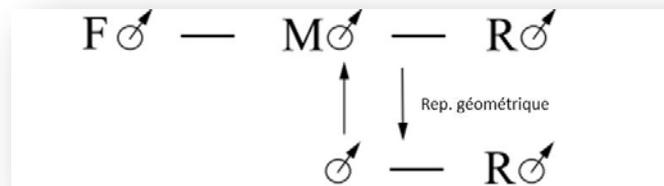


Figure 73 : Les utilisateurs A et B collaborent à l'étape de la cartographie visuelle, mais les données filtrées demeurent privées à A (Wood et *al.* 1995)

Ces différents modèles pourront nous servir plus tard dans la proposition de services de visualisations adaptées. Mais pour revenir à notre problématique de recherche, nous semblons comprendre que la visualisation collaborative, telle que présentée dans la littérature dédiée, ne se réfère pas vraiment à la visualisation d'un contexte d'activité collective. Pour nous en assurer, nous jugeons important d'explorer les systèmes de visualisation collaborative, tel que recensés dans le domaine scientifique concerné.

4.2.2 Les systèmes de visualisation collaborative

Nous présentons ici les systèmes de visualisation collaborative décrits dans la littérature, dans le but de comprendre quel type de système est généralement considéré comme étant un système de visualisation collaborative.

4.2.2.1 Le recensement de Grimstead et al.

En 2005, Grimstead et al. (2005) ont divisé la visualisation collaborative basée sur l'ordinateur en cinq domaines à savoir : les environnements de résolution collaborative de problème (PSE), les environnements multi-utilisateurs de réalité virtuelle (MUVR), les environnements de réalité virtuelle collaborative (CVR), les jeux en ligne multijoueurs (MPOG) et les extensions multi-utilisateurs d'outils d'applications mono-utilisateurs (MUE).

Les environnements visuels de résolution de problème (PSE) sont généralement des environnements de visualisation modulaires augmentés du pilotage informatique et du couplage lâche entre les données sources et la modification des données pour la visualisation. Les paramètres peuvent notamment être ajustés pendant que la simulation est en cours, sans avoir à attendre des heures voire des jours pour l'exécution d'une simulation complète avant d'effectuer l'analyse.

Selon Grimstead et al. (2005), les environnements de réalité virtuelle, souvent utilisés pour aider plusieurs utilisateurs, varient des environnements entièrement immersifs avec une haute fidélité pour un petit nombre d'utilisateurs, à des systèmes massifs multi-utilisateurs avec une immersion minimale. Si l'objectif de certains systèmes est de permettre simplement à plusieurs utilisateurs de « co-exister » dans un espace partagé (c'est le cas des systèmes MUVR), d'autres systèmes sont étendus de manière à assister la collaboration (c'est le cas des systèmes CVR).

Les jeux en ligne multijoueurs (MPOG) prennent en charge eux aussi plusieurs utilisateurs à travers des architectures distribuées, mais ont la particularité de supposer que chaque client dispose de ressources suffisantes pour recevoir les données brutes plutôt que des sections pré-préparées de scène graphique. Les utilisateurs payent généralement pour jouer aux MPOG, contrairement aux environnements de réalité virtuels qui sont habituellement des systèmes « faits maison » utilisés pour l'enseignement ou l'exploration. Le fait que les utilisateurs payent oblige le système à mettre davantage l'accent sur la sécurisation afin d'éviter les pertes financières et la tricherie. Il existe généralement une certaine forme de communication inter-utilisateurs dans les MPOG, vu que les joueurs sont géographiquement dispersés et ne se connaissent pas en dehors du jeu. À cet effet, le chat textuel et la discussion audio sont souvent utilisés, utilisant une bande passante supplémentaire de communication en dehors du mécanisme du jeu (Grimstead et al. 2005).

Les systèmes MUE permettent d'étendre des applications existantes de manière à prendre en charge simultanément et sans modification plusieurs utilisateurs. Le prix à payer est souvent que l'application doive être exécutée sur une machine unique, ce qui peut désactiver ou interrompre son utilisateur local. Les applications préexistantes étant activées, aucune connaissance ne peut être prise sur les données qui doivent être transférées sur le réseau, de sorte que les mémoires tampons locales (ou leur description) sont transmises. La transmission des mémoires tampon à partir d'une seule machine verrouille les utilisateurs à un seul affichage et par conséquent à un taux d'interaction. Le nombre d'utilisateurs pris en charge se trouve restreint étant donné que la seule machine sera rapidement dépassée par le trafic réseau (Grimstead et al. 2005).

4.2.2.2 La classification plus récente de Mouton et al.

Plus récemment, Mouton et Sons (Mouton & Sons 2011) ont proposé trois principales catégories de systèmes de visualisation collaborative. Il s'agit des systèmes d'ingénierie assistée par ordinateur,

des environnements de jeu en ligne multi-utilisateurs et des outils génériques de visualisation collaborative.

L'exemple typique de système de visualisation collaborative en ingénierie assistée par ordinateur qu'ils donnent est COVISE (*Collaborative Visualization and Simulation Environment*), développé au Computer Center de l'université de Stuttgart. Il s'agit d'un environnement logiciel visant à intégrer les tâches de visualisation et de simulation entre des plates-formes matérielles hétérogènes d'une manière transparente, et permettant à plusieurs utilisateurs de travailler de façon collaborative (Rantzau & Lang 1998). Selon Rantzau et Lang, tous les partenaires voient les mêmes représentations à l'écran au même moment depuis leur lieu de travail local, et aussi bien les résultats de la visualisation que les interactions sont affichés de manière synchronisée sur chaque site (Rantzau & Lang 1998). D'autres systèmes sont présentés dans cette catégorie, comme RAVE (*Resource-Aware Visualization Environment*), ParaView, etc.

Selon Mouton et *al.* (2011), les outils génériques de visualisation collaborative sont incapables de faire une hypothèse sur le format des données. Ils s'appuient donc sur l'échantillonnage de la mémoire tampon graphique des systèmes distants (l'affichage de l'écran) et son envoi aux parties intéressées sous la forme d'un flux de vidéo. Ces systèmes peuvent être considérés comme étant de simples outils de « partage d'écran » n'interférant pas avec les applications existantes. Un exemple de ce genre de système est le *Remote Desktop Protocol* (RDP) de Microsoft, utilisé pour la transmission d'un accès desktop complet d'une machine vers un client distant. Le *Virtual Network Computing* (VNC) est un autre exemple de système de capture et de transmission d'écran.

◆ Retenons, avant d'aller plus loin :

- 1) Le champ scientifique de la Visualisation Collaborative se situe à la frontière de la Visualisation de l'Information et du TCAO.
- 2) Les théories de Visualisation Collaborative la définissent comme étant l'utilisation partagée de représentations visuelles et les recensements d'outils de visualisation collaborative confirment cette tendance.
- 3) Notre besoin ne se limite pas à l'utilisation partagée de représentations graphiques, mais concerne également la visualisation d'un contexte d'activité collective.
- 4) Certains concepts de Visualisation Collaborative peuvent nous aider dans la proposition de services de visualisations adaptées.

4.3 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principales dimensions du Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO) et de la Visualisation Collaborative. Deux approches existent pour le concept d'assistance par ordinateur : l'approche technologique et l'approche fonctionnelle. Tandis que

l'approche technologique limite l'idée d'assistance à l'application de matériels et de logiciels, l'approche fonctionnelle, utilisée pour définir les besoins pour les applications de TCAO spécifiques à une situation, identifie un ensemble de besoins et de problèmes pouvant être abordés par l'assistance par ordinateur. Les dix dimensions clés utilisées pour décrire les systèmes de TCAO sont le temps, l'espace, la taille du groupe, le style d'interaction, le contexte, l'infrastructure, la mobilité du collaborateur, son intimité, la sélection du participant, et l'extensibilité. Trois espaces fonctionnels sont généralement considérés dans les systèmes de TCAO : l'espace de communication, l'espace de coordination et l'espace de production. Par ailleurs, plusieurs travaux scientifiques ont proposé différentes classifications des outils de TCAO. Les différentes dimensions qui reviennent le plus souvent ne permettent pas de décrire les éléments du contexte de coopération qui influencent les besoins de visualisation de l'acteur. De nouvelles approches ont récemment vu le jour pour permettre la description du travail collaboratif (personas collectifs, types de collaboration, etc.) et du contexte de collaboration. Ces approches font ressortir de nouveaux concepts de description du contexte de l'activité, complétant les éléments déjà identifiés dans les travaux précédents.

La Visualisation Collaborative, considérée comme étant un sous-domaine scientifique du TCAO, se situe à la frontière du TCAO et de la Visualisation de l'Information. Elle utilise les théories de ces deux domaines scientifiques pour décrire les besoins et les systèmes de visualisation collaborative. Nous avons vu que la visualisation collaborative, telle que présentée dans ces théories, se rapporte essentiellement à l'utilisation partagée de représentations visuelles. Mais nos besoins ne se limitent pas à cela et concernent aussi et surtout la visualisation d'un contexte d'activité collective. Toutefois, nous avons jugé utile d'aller plus loin dans la compréhension de certains aspects de cette littérature, car ils pourraient nous être très utiles dans la proposition de services de visualisations adaptées.

Nous verrons dans le chapitre suivant comment nous comptons nous baser sur les enseignements de ce chapitre et du chapitre précédent pour proposer une méthode répondant à notre problématique de recherche.

Troisième partie :

Notre proposition : vers une méthode de conception de vues multiples 4D/nD adaptées

Contenu :

- Chapitre 5 :** Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD et raffinement de la problématique
- Chapitre 6 :** Méthode de conception de vues multiples adaptées dans le cadre de la simulation collaborative 4D/nD de la construction
- Chapitre 7 :** Application à la simulation 4D de la construction et validation de la méthode proposée

**CONCEPTUALISATION DE LA NOTION DE SIMULATION COLLABORATIVE
4D/ND ET RAFFINEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE**



"To put it boldly, it is the attempt at a posterior reconstruction of existence by the process of conceptualization."

Albert Einstein

5 Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD et raffinement de la problématique

Après le recul théorique réalisé dans les chapitres précédents pour comprendre la visualisation et le travail collaboratif, le premier travail dans le cadre de notre proposition consiste en un effort de conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction, présenté dans la première partie de ce chapitre. Cette conceptualisation nous permet de raffiner, dans la deuxième partie, notre problématique avant de présenter la méthode proposée dans le chapitre suivant.

5.1 Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD

Dans cette partie, nous proposons de comprendre la simulation 4D/nD collaborative de la construction. Nous commencerons par une présentation des différents concepts sous-jacents. À cet effet, nous aborderons la simulation, les étapes d'une simulation et le lien capital existant entre la visualisation et la simulation. Ensuite, nous définirons les notions importantes de l'activité collective dans la construction telles que la collaboration, la coopération et la coordination et nous ferons ressortir les éléments d'un contexte coopératif dans la construction. Cela nous permettra de proposer une définition pour la simulation 4D/nD collaborative. Cette définition sera illustrée par quelques situations et outils.

5.1.1 La simulation

5.1.1.1 Qu'est-ce qu'une simulation ?

La simulation d'un système consiste à réaliser un modèle du système qui peut être reconfiguré et éprouvé, ce qui est la plupart du temps impossible, trop cher ou pas pratique dans le système réel (Maria 1997). Le modèle est similaire, mais plus simple que le système qu'il représente. On peut étudier le fonctionnement du modèle et en déduire les propriétés concernant le comportement du

système réel (Figure 74). « Dans un sens large, la simulation est donc un outil d'évaluation des performances d'un système, existant ou proposé, sous différentes configurations d'intérêt et sur de longues périodes de temps réel » (Maria 1997). La simulation informatique consiste donc, selon Fishwick, à concevoir un modèle d'un système physique réel ou théorique, à exécuter le modèle sur un ordinateur ou un autre support numérique, et à analyser le résultat de l'exécution (Fishwick 1995). Pour comprendre une réalité et toute sa complexité, il faut construire des modèles artificiels de ses objets et les faire fonctionner en leur faisant jouer différents rôles. Il faut différencier les simulations à événements discrets (*discret event simulations*) des simulations continues (*continuous simulations*). L'hypothèse principale dans les simulations à événements discrets est que le système change instantanément en réponse à des événements discrets, alors que dans le cas des simulations continues, on essaie d'évaluer les changements dans un système de manière continue dans le temps, en réponse à des contrôles (Maria 1997).

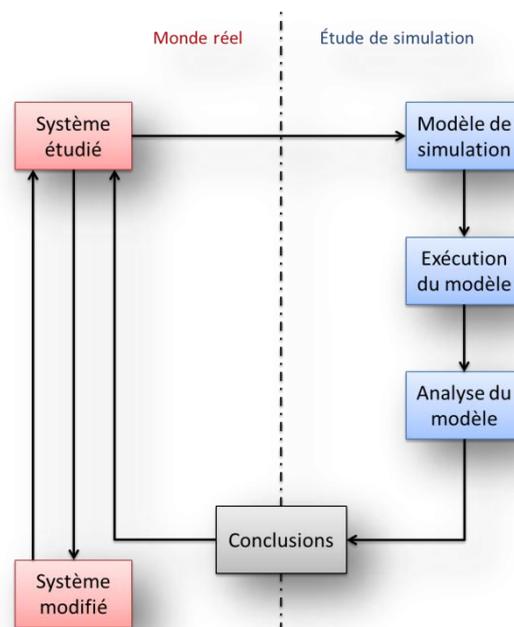


Figure 74 : Vue schématique d'une étude de simulation [adapté de (Maria 1997)]

La simulation est généralement utilisée avant la modification d'un système existant ou la construction d'un nouveau système, afin de réduire les risques d'échec, répondre aux spécifications, éliminer les imprévus, éviter toute surutilisation ou sous-utilisation des ressources, et optimiser les performances du système (Maria 1997). À cet effet, elle est essentielle dans les cas suivants (Fishwick 1995) :

- le modèle est très compliqué avec plusieurs variables et composantes interagissant ;
- les relations entre les variables sous-jacentes ne sont pas linéaires ;
- le modèle contient des variables aléatoires ;
- le résultat du modèle doit être visuel.

5.1.1.2 Les étapes d'une simulation

Maria (1997) propose onze étapes pour une simulation. Ces étapes sont les suivantes :

- **Étape 1 — identifier le besoin** : il s'agit à cette étape d'énumérer les problèmes avec un système existant ou de produire des besoins pour un nouveau système.
- **Étape 2 — formuler le besoin** : à cette étape, le besoin doit être formulé de la manière la plus précise possible. Il est important de définir les limites du système, l'objectif général et quelques objectifs spécifiques, l'utilisateur final de la simulation, etc.
- **Étape 3 — collecter et traiter les données du système réel** : collecter les données sur les spécifications du système étudié, les variables en entrée, les performances, les sources d'aléa dans le système, les variables d'entrées aléatoires, etc.
- **Étape 4 — formuler et développer le modèle** : ici, il faut développer des modèles conceptuels (schémas ou diagrammes de réseau) du système, transformer ces modèles conceptuels en modèles informatiques de simulation acceptables. Il faut également vérifier que les modèles fonctionnent comme prévu.
- **Étape 5 — valider le modèle** : la validation du modèle consiste à comparer les performances du modèle sous des conditions connues, avec les performances du système réel. Il s'agit également d'évaluer la confiance que l'utilisateur final place dans le modèle et résoudre les éventuels problèmes.
- **Étape 6 — documenter le modèle pour sa future utilisation** : il est important de documenter en détail les objectifs, les hypothèses ainsi que les variables en entrée.
- **Étape 7 — sélectionner le protocole expérimental approprié** : il s'agit ici de réaliser un test ou une série de tests où des changements significatifs sont apportés aux variables d'entrée du modèle de simulation de manière à observer les raisons des changements dans les mesures de performance. Le nombre d'expérimentations dans une étude de simulation est supérieur ou égal au nombre de questions posées à propos du modèle.
- **Étape 8 — mettre en place les conditions expérimentales pour la simulation** : parce qu'il est essentiel d'obtenir des résultats pertinents et le maximum d'information de chaque expérimentation, il est important de mettre en place des conditions optimales d'expérimentation (par exemple, sélectionner les conditions de démarrage appropriées, le nombre d'expérimentations indépendantes, taille d'échantillons, etc.).
- **Étape 9 — réaliser les simulations** : réaliser les simulations conformément aux choix des étapes 7 et 8.
- **Étape 10 — interpréter et présenter les résultats** : à cette étape, il faut documenter les résultats et tirer des conclusions de manière à tester les hypothèses à propos des performances du système. Dans la mesure du possible, il faut réaliser des représentations graphiques.
- **Étape 11 — recommander d'autres mesures ou actions** : ces recommandations peuvent inclure davantage d'expérimentation pour améliorer la précision et réduire les biais.

Ces différentes étapes permettent de répondre aux questions fondamentales liées aux trois phases de la simulation identifiées par Fishwick (1995) et qui sont la réalisation du modèle (étapes 1 à 6), l'exécution du modèle (étapes 7 à 9), et l'analyse du modèle (étapes 10 et 11). La Figure 75 résume ces phases, avec les étapes correspondantes.

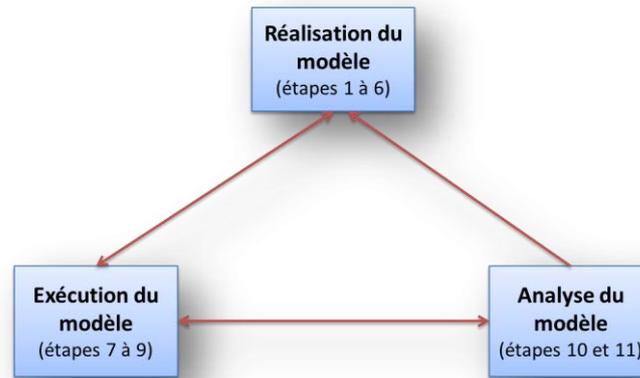


Figure 75 : Les étapes correspondant aux différentes phases d'une simulation

5.1.1.3 Simulation et visualisation

La visualisation est définie comme étant une activité cognitive facilitée par des représentations visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation mentale du monde (Mazza 2009). En général, le lien entre visualisation et simulation semble si évident que dans le secteur de la construction par exemple, il est très courant de parler de visualisation 4D pour désigner les simulations basées sur la CAO 4D. Kuljis et Paul se sont même demandé si visualisation et simulation ne seraient pas tout simplement deux faces d'une même médaille (Kuljis & Paul 2001). À notre avis, le lien entre les deux concepts se situe à trois niveaux principaux :

- **La plupart des études de simulations présentent un intérêt visuel évident qui justifie par ailleurs leur réalisation** : c'est le cas par exemple de la simulation 4D pour lequel il est question de visualiser dans le temps et dans l'espace l'ordonnancement des activités à réaliser dans le cadre du projet de construction. À cet effet, l'intérêt visuel est très fort aussi bien pour la communication des idées, la planification de la logistique, dans la vérification des conflits spatio-temporels, que pour l'étude de constructibilité. L'enquête réalisée par Ganah et *al.* (2000) montre d'ailleurs bien l'intérêt des professionnels pour la visualisation en matière d'étude de constructibilité.
- **La simulation profite des techniques de visualisation pour améliorer la perception des utilisateurs** : les théories sur l'amélioration de la visualisation peuvent effectivement être intéressantes pour améliorer la perception de l'objet de la simulation (Kuljis & Paul 2001). À cet effet, Telea remarque que la visualisation scientifique par exemple ajoute une dimension importante au processus d'acquisition de l'aperçu dans les processus simulés, et les analyses post-simulation demandent un examen et une interprétation visuels relevant de la visualisation de l'information (Telea 2000).
- **Les technologies de visualisation peuvent étendre la portée de l'activité de simulation** : en identifiant plusieurs rôles possibles de la technologie de visualisation pour augmenter le pouvoir d'un système de simulation, Kuljis et Paul (2001) ont mis l'accent sur le fait que la technologie de visualisation étendrait la portée de la simulation encore plus loin de manière à permettre la simulation de processus ou d'activités latents (ou cachés).

La visualisation est donc très importante dans la simulation dans la mesure où elle est nécessaire pour percevoir et bien comprendre les phénomènes étudiés. Nous utiliserons ce lien plus tard dans la formulation de nos hypothèses.

Afin de pouvoir proposer une bonne définition de la simulation collaborative 4D/nD de la construction, il est nécessaire de comprendre les théories sur la collaboration, la coopération et l'activité collective dans le secteur.

5.1.2 Collaboration et coopération dans le secteur de la construction

5.1.2.1 L'activité collective dans la construction

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, plusieurs professionnels interviennent de manière très complémentaire dans l'exécution d'un projet de construction. Les interdépendances entre ces acteurs confèrent un caractère essentiel à l'activité collective. Pour définir l'activité collective, nous allons nous appuyer sur Kubicki (2006) :

« Une activité collective implique de nombreux acteurs, qui interagissent et génèrent de l'information en vue d'atteindre un objectif commun. Les objectifs peuvent être nombreux et variés, par exemple le suivi d'un cours, l'apprentissage d'un nouveau savoir, la rédaction d'un document, le partage d'une connaissance, la réalisation d'un voyage ou la construction d'une voiture. La caractéristique importante de l'activité collective est qu'un tel rassemblement d'acteurs nécessite la mise en œuvre de protocoles de coordination pour encadrer leur travail. La coopération et la collaboration sont souvent perçues dans les théories sociologiques comme des formes de coordination, car elles mêlent une organisation d'acteurs à des pratiques de coordination associées » (Kubicki 2006), pages 105-106.

Comme nous l'avons dit (paragraphe 1.1.2.1 et 1.1.2.3), une particularité du secteur de la construction réside dans sa fragmentation et le fait que les différents acteurs impliqués proviennent d'organisations diverses et travaillent ensemble de manière temporaire, dans le but d'atteindre un objectif commun. Kubicki (2006) note que les besoins peuvent être à la fois inter-organisationnels et intra-organisationnels. En effet, s'il est vrai que les participants viennent d'organisations diverses (inter-organisationnel), il est aussi vrai que le projet en lui-même met en œuvre une organisation propre (intra-organisationnel). Cette organisation est conditionnée à la fois par le contexte juridique du pays, la contractualisation ou la complexité du projet.

Tout au long des phases du projet, des besoins différents de collaboration et de coopération vont apparaître, faisant appel à des mécanismes de coordinations particuliers. Le besoin d'information des acteurs va quant à lui varier en fonction du rôle qu'ils ont sur le projet. Il est très important de rappeler que les mêmes acteurs n'ont pas toujours les mêmes rôles sur les projets de construction et que chaque projet met en œuvre un contexte différent d'activité collective. Il faut donc pouvoir décrire ce contexte afin d'identifier les parties prenantes et de bien comprendre les besoins de chaque acteur.

Nous proposons de revenir sur la description du contexte de l'activité collective dans les projets de construction. Mais avant cela, il nous semble important de différencier les notions de coopération et de collaboration qui tendent généralement à se confondre.

5.1.2.2 Collaboration, coopération et coordination

Kubicki a tenté de définir la collaboration comme suit :

« Forme d'activité dans laquelle l'organisation des acteurs se construit autour de la "résolution commune d'un problème". Il s'agit de travailler ensemble afin de formuler des solutions qui satisfassent tous les acteurs concernés (Kvan 2000). Dans les formes organisationnelles liées à l'activité collaborative, les acteurs ont des relations durables et proches, et ils partagent un objectif commun (Hanser 2003). La coordination se traduit souvent par des règles et des rôles qui sont attribués aux acteurs afin de favoriser leur engagement. Le déroulement des activités de chacun est planifié au maximum afin de réduire les incertitudes lors de la réalisation » (Kubicki 2006), page 106.

Concernant la coopération, il ajoute :

« Dans la coopération entre acteurs, les relations sont plus informelles, sans mission, structure ou effort commun particulièrement définis (Kvan 2000). Dans les formes d'organisations liées à l'activité de coopération, l'information est partagée "au besoin" et l'autorité est "détenue" par chacune des organisations participantes. Enfin, les ressources et les récompenses sont clairement séparées entre les membres » (Kubicki 2006), page 106.

La coordination se rapporte aux modes d'organisation et d'articulation des actions des individus et des groupes d'une activité collaborative. En constatant que les notions de « tâche » et de « ressource » sont essentielles dans la coordination, Kubicki (2006) distingue la gestion des interdépendances entre les membres et celle des interdépendances entre les processus. Il se base par ailleurs sur les configurations organisationnelles proposées par Mintzberg (supervision directe, standardisation des procédés, standardisation des résultats, standardisation des qualifications, et ajustement mutuel) pour identifier trois principaux mécanismes de coordinations correspondant à l'activité de construction : la configuration hiérarchique, la configuration adhocratique et la configuration transversale (Figure 76).

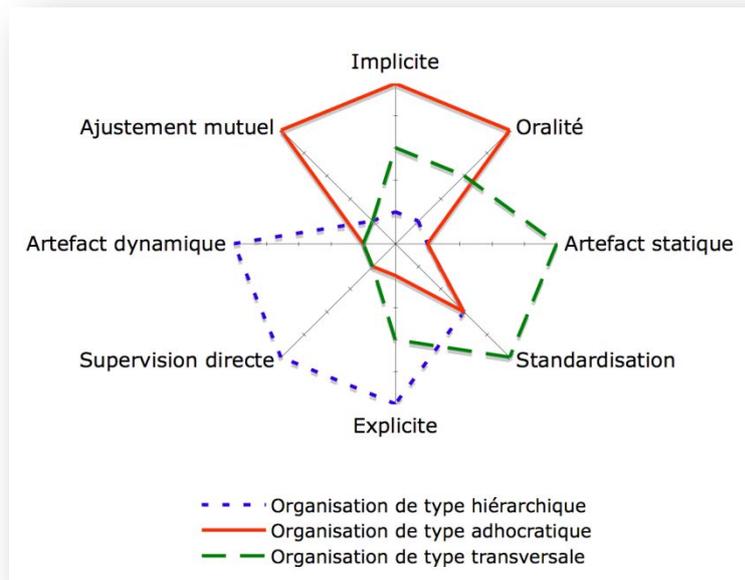


Figure 76 : Les mécanismes de coordination et leurs liens avec les typologies organisationnelles (Kubicki 2006)

En ce qui nous concerne, nous parlerons plus généralement de collaboration pour insister sur le fait que différents acteurs du secteur se mettent ensemble pour réaliser une activité collective de planification de la construction.

5.1.2.3 Les contextes de l'activité collective dans le secteur de la construction

Nous avons dit plus haut que chaque projet de construction met en œuvre un contexte de collaboration particulier et qu'il est important de pouvoir décrire ce contexte afin d'identifier les parties prenantes et de bien comprendre les besoins de chaque acteur.

Kubicki (2006) identifie trois facettes du contexte, tel que représentées sur la Figure 77. Il s'agit du contexte de l'activité collective, du contexte de l'acteur et du contexte de l'utilisateur d'un outil. Selon lui :

« le **contexte de l'activité collective** « concerne l'activité, son objectif, les moyens mis en œuvre pour les atteindre, les acteurs impliqués, leurs relations, ou encore les artefacts qu'ils manipulent et produisent » (Kubicki 2006), page 131.

« Le **contexte de l'acteur** agissant dans une activité collective regroupe les connaissances que celui-ci manipule et les mécanismes cognitifs qu'il met en œuvre pour agir. Ces mécanismes sont fortement influencés par sa formation, son métier, mais aussi son rôle dans l'activité collective » (Kubicki 2006), page 131.

« le **contexte de l'utilisateur d'un outil** (logiciel) contient les informations utiles pour adapter l'outil à l'utilisateur : localisation, nature du terminal utilisé, etc. On y retrouve aussi les informations transmises par l'utilisateur dans une optique de personnalisation de l'outil (préférences d'utilisation par exemple) » (Kubicki 2006), page 131.

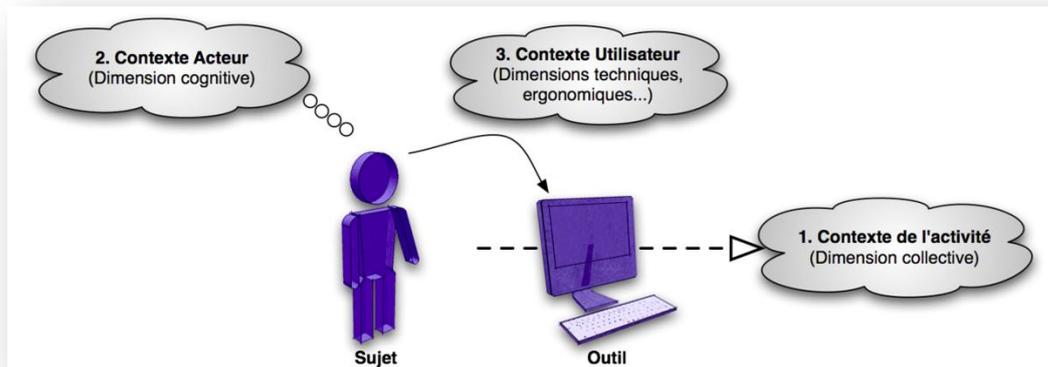


Figure 77 : Les trois contextes considérés par Kubicki (2006)

Dans la suite du présent mémoire, nous ferons référence à ces trois contextes dans notre argumentation, notamment pour positionner les concepts que nous introduisons par rapport aux éléments déjà décrits.

5.1.3 La simulation collaborative 4D/nD de la construction

5.1.3.1 Composantes de la simulation collaborative 4D/nD

Au vu de la définition de la simulation et de la compréhension de l'activité collective dans la construction, nous pouvons déduire que la simulation collaborative 4D/nD de la construction consiste à réaliser, de manière collaborative et/ou pour assister la collaboration, un modèle 4D/nD de l'ouvrage à construire. L'utilisation d'un modèle 4D pour assister la collaboration entre les acteurs est illustrée avec la Figure 30 du chapitre 2. La réalisation collaborative met l'accent sur l'interaction dans un environnement en réseau, où un modèle 3D partagé est accessible à tous les membres de l'équipe de planification de manière à favoriser une session de planification collaborative. Le modèle 3D constitue donc un point de départ commun permettant à des acteurs de plusieurs disciplines de se connecter et de réaliser leur travail de planification en se concentrant chacun sur différents aspects de la planification. Parce qu'ils doivent discuter entre eux pour examiner des variantes de solution et vérifier les conflits, l'interaction « entre eux » ainsi que celle « entre eux et le système » et l'incorporation des données sont particulièrement importantes pour maintenir un contexte de planification ouvert (Zhou et al. 2009).

Pour bien comprendre le contexte d'une simulation collaborative, il nous semble nécessaire de réaliser un recul théorique. Nous y ferons appel à la notion de *collaborative simulation modelling* telle que présentée par Taylor et Robinson (Taylor & Robinson 2003) et qui présente bien des similitudes avec la simulation collaborative 4D/nD.

Selon Taylor et Robinson, le réseau GROUPSIM⁶ a introduit la notion de *collaborative simulation modelling*, que nous pouvons traduire en français comme la modélisation pour la simulation collaborative, qui comprend l'étude de l'interaction humain-à-humain, de l'interaction machine-à-

⁶ [www.groupsim.com], consulté le 11/06/2012

machine, et la synergie entre les deux, pour assister les pratiques de modélisation pour la simulation (Taylor & Robinson 2003).

En s'appuyant sur Ormerod (2001), Taylor et Robinson identifient 5 types de rôles différents dans une simulation collaborative (voir Tableau 14). Ces types de rôles sont :

- le **doer** (qu'on pourrait traduire en français par le faiseur) : dans le cas de la simulation, il s'agit du modéleur, celui qui réalise la simulation. Dans le cas de la simulation de la construction, le *doer* peut être un spécialiste principal recruté sur le projet juste pour la réalisation du modèle 4D/nD ;
- le **done for** (celui pour qui c'est fait) : c'est le client pour qui la simulation est réalisée. Pour le cas de la simulation de la construction, le *done for* peut être le maître de l'ouvrage ou l'architecte qui ont directement besoin du modèle, mais qui en confient la réalisation à un spécialiste ou à un groupe de spécialistes (le *doer*). Il peut également s'agir des différentes entreprises et des sous-traitants qui utiliseront la simulation pour comprendre leur travail ;
- le **done with** (celui avec qui c'est fait) : ce sont les membres de l'équipe de simulation. Pour la simulation de la construction, les *done with* peuvent être tous les représentants de corps de métiers qui contribuent à l'élaboration de la simulation, au cas où elle est participative. Sinon, il s'agira de chacun des spécialistes faisant partie de l'équipe de simulation ;
- le **done to** : ce sont les personnes chez qui l'on obtient l'information et les données nécessaires pour la simulation. Pour la simulation de la construction, il peut s'agir des sous-traitants qui fournissent chacun l'information relative à leur lot de travail. Il peut également s'agir des spécialistes métiers qui donnent leur avis sur des aspects de constructibilité ;
- le **done without** : il s'agit de ceux qui ne participent pas à la simulation, mais qui sont néanmoins directement intéressés par les résultats. Dans le cas de la simulation de la construction, le *done without* peut être n'importe quelle entreprise ou sous-traitant qui n'est pas impliqué dans la réalisation de la simulation, mais pour qui elle est utile dans son activité.

Tableau 14 : Différents rôles dans une étude de simulation collaborative

Doers	Gestionnaire de projet	Responsable de la gestion du processus; peut ne pas avoir des compétences spécifiques de modélisation
	Modeleur	Développe le modèle (conceptuel et informatique)
	Utilisateur du modèle (à un stade avancé)	Expérimentations avec le modèle pour obtenir la compréhension et la recherche de solutions au problème du monde réel
Done for	Clients	Le propriétaire du problème et destinataire des résultats ; finance directement ou indirectement le travail
	Utilisateur du modèle (dès les débuts)	Destinataire du modèle
Done with	Fournisseur de données	Experts du domaine pouvant fournir des données et de l'information pour le projet
	Aide à la modélisation	Expert tiers (éditeur de logiciel, consultant, ou expert interne) offrant un soutien logiciel et/ou expertise en modélisation
Done to	Personnes interviewées pour l'information	un groupe élargi de personnes chez qui l'information est obtenue
Done without	Direction, personnel, clients	Bénéficiaires du projet, mais qui ne participent pas ; dans certains cas, ils ne connaissent pas le projet

Nous proposons la figure ci-dessous (Figure 78) pour résumer les différentes composantes présentées dans ce paragraphe.

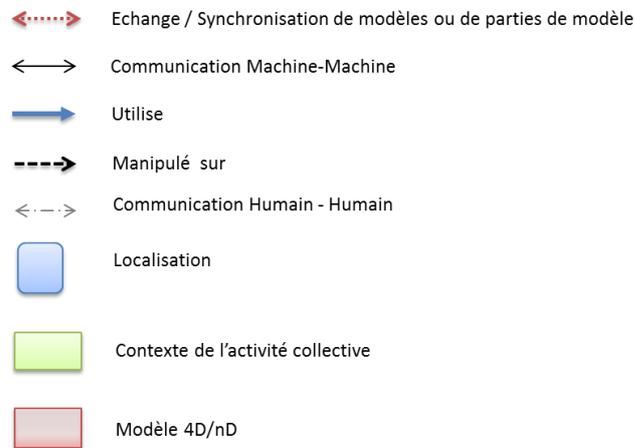
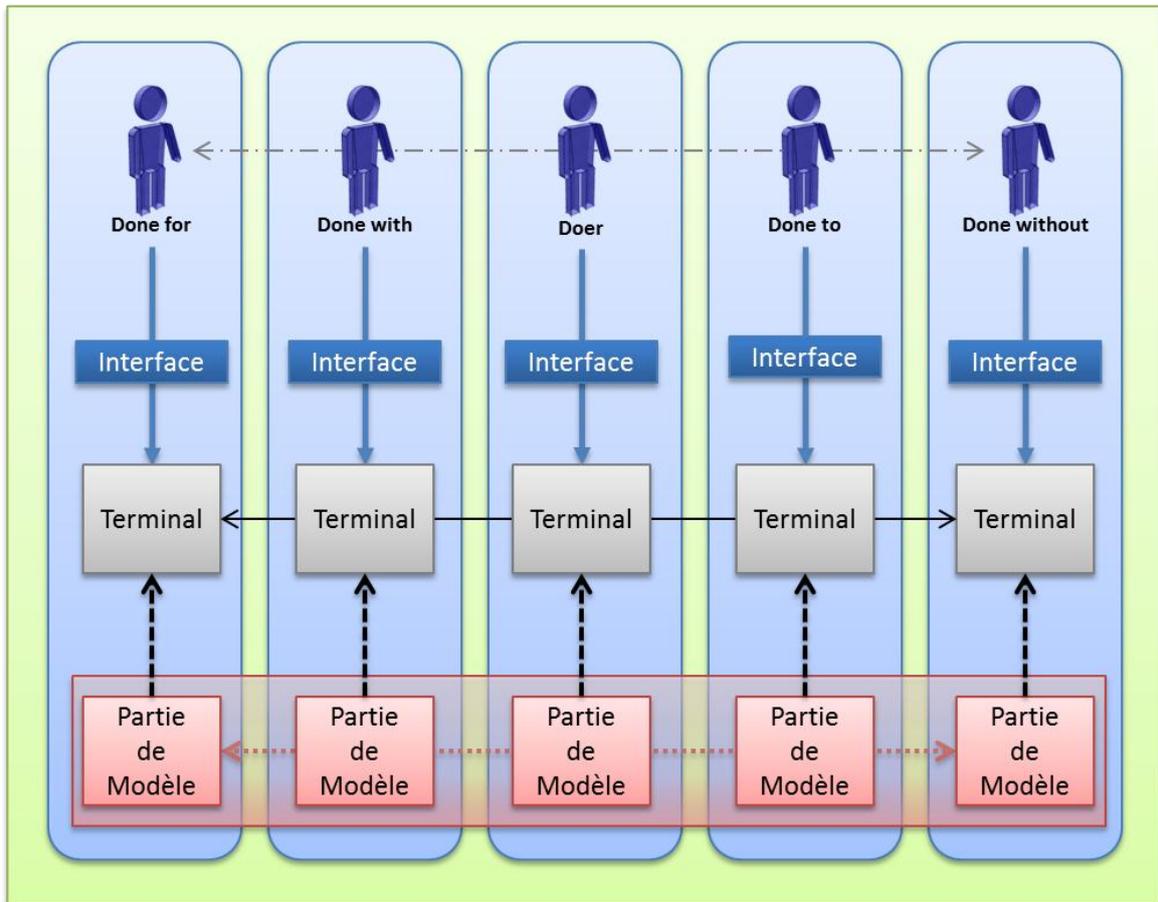


Figure 78 : principales composantes de la simulation collaborative 4D/nD de la construction

5.1.3.2 Les approches de planification 4D/nD

Avant d'aborder les méthodes de simulation collaborative 4D/nD, il faut d'abord comprendre les approches utilisées actuellement pour réaliser une simulation 4D. Elles sont au nombre de trois : la liaison manuelle, l'automatisation et l'assemblage manuel (Zhou et al. 2009).

- **La liaison manuelle (simulation indépendante)** : Dans cette approche, le lien entre le modèle 3D et le planning des activités est réalisé manuellement en utilisant un logiciel tiers de 4D. Le modèle 3D est donc réalisé en utilisant des outils dédiés de conception

assistée par ordinateur (CAO) et le planning provient d'un logiciel de planification généralement avec la méthode CPM. Selon Zhou et *al.* (2009), la plupart des solutions commerciales de simulation 4D (Navisworks, CommonPoint, xD Virtual Builder, etc.) sont initialement conçues sur la base de cette approche et plusieurs études scientifiques sur la simulation 4D ont été réalisées en utilisant cette approche (Collier & Fischer 1995; Haymaker & Fischer 2001; Kim et *al.* 2001). La caractéristique principale de cette approche (utilisée pour la revue post-planification d'une planification existante plutôt que pour un processus initial de planification) réside dans son processus indépendant de la modélisation 3D, de la planification et de la liaison entre la structure de décomposition du produit (PBS) et la structure de découpage du projet (WBS). Même si elle est fonctionnelle, cette approche est limitée par le fait qu'elle ne permet pas réellement l'interaction entre différentes personnes. Le *doer* interagit avec des informations existantes sur son propre système indépendant pour construire le modèle. Les informations de planification existant déjà, les *done with* et les *done to* ne sont pas (ou très peu, souvent pour vérifier une information) sollicités. Une fois le modèle réalisé, il peut être transféré aux *done for* ou aux *done without* qui vont l'utiliser comme outil de suivi ou de prise de décision.

- **L'automatisation (modélisation intégrée)** : Cette approche automatise la liaison du PBS au WBS de manière à générer un lien automatique entre un modèle 3D et un planning. Dans le cadre du projet VIRCON, Dawood & *al.* ont proposé une base de données intégrée définissant les relations entre le PBS et le WBS de manière à générer automatiquement une simulation 4D dans un environnement AutoCAD (Dawood et *al.* 2002). Cette approche utilise donc, comme dans le cas de l'approche précédente, un planning prédéfini et un modèle 3D existant, mais automatise leur liaison. Plus récemment, de Vries et Harink (De Vries & Harink 2007) ont proposé un algorithme devant permettre la génération automatique du planning à partir d'un modèle 3D. Il serait ainsi possible de générer, à partir du PBS obtenu d'un modèle 3D AutoCAD, un WBS exportable vers MS Project pour la création du planning. Plusieurs outils commerciaux de 3D ont ainsi pu intégrer des fonctions, plus ou moins convaincantes, de génération de 4D dans leurs packages (Graphisoft ArchiCAD, Autodesk Revit, Tekla, etc.). Si cette approche est très intéressante, elle limite l'interaction des acteurs et conduit à une planification très stéréotypée souvent peu adaptée aux réalités spécifiques du projet. Elle donne cependant une appréciation du planning des travaux très tôt dans le processus de conception. Cette approche ne fait pas vraiment la différence entre les différents rôles (*doer, done for, done with, done to, done without*) dans la mesure où n'importe quel acteur peut réaliser le modèle 4D dès lors qu'il est en mesure de faire le modèle 3D.
- **L'assemblage manuel** : Cette approche propose d'utiliser la simulation 4D comme outil de planification initiale et non plus uniquement de revue d'ordonnancement. L'intérêt est de pouvoir générer de manière interactive un planning à partir d'un modèle 3D de la construction. Les applications de cette approche se basent pour la plupart sur la réalité virtuelle (Frohlich et *al.* 1997; Waly & Thabet 2002; Thabet & Wakefield 1999). Cette approche permet aux acteurs impliqués dans la planification (*done for, done with, done to, done without*) d'interagir ensemble sur un modèle virtuel de l'ouvrage préalablement

réalisé (par le *doer*) pour évaluer plusieurs alternatives de planification du processus de construction.

Par ailleurs, plusieurs travaux se sont intéressés à l'aspect collaboratif du processus de planification dans le but d'améliorer la simulation collaborative 4D/nD.

5.1.3.3 Quelques travaux sur la simulation collaborative 4D/nD de la construction

Un enjeu important des approches de simulation collaborative 4D/nD est la prise en compte des besoins de collaboration dans la planification de la construction. À cet effet,

- le CIFE (*Center for Integrated Facility Engineering*) de l'université de Stanford a développé l'**iRoom** (Figure 79) présenté comme étant un système intégré de collaboration entre différents professionnels de la construction (Fischer et *al.* 2002). Dans sa version originale, l'iRoom se compose d'un serveur et de trois ordinateurs PC reliés à des vidéoprojecteurs et de larges écrans. Les écrans peuvent être consultés simultanément et le système inclut plusieurs applications (Ms Project, Excel, 4D Modeler, etc.) et des visionneuses, de sorte que les utilisateurs puissent visualiser en même temps un scénario 4D sur des écrans différents. Les vues proposées dans les applications sont synchronisées et en cliquant sur une activité, l'utilisateur a la possibilité de mettre en évidence la même information ou les informations relatives dans les autres applications. La collaboration entre les acteurs impliqués dans la planification se passe au même endroit, de manière synchrone. Pour augmenter la perception des utilisateurs, l'iRoom a intégré les solutions de visualisation que nous avons évoquées dans le paragraphe 2.2.2.1, page 89.



Figure 79 : L'iRoom du CIFE (Garcia et *al.* 2004)

- Waly et Thabet (Waly & Thabet 2002) ont proposé un **environnement de construction virtuelle (VCE)** pour la planification en phase de pré-construction. À cet effet, ils introduisent une Interface Virtuelle Interactive (IVI) définie comme étant une disposition virtuelle dynamique permettant à l'équipe de projet de répéter (simuler) la construction

de l'ouvrage de manière assez réaliste. Avec une approche de construction manuelle (définie plus haut), la répétition virtuelle se base sur la manipulation et la modification d'un modèle 3D prédéfini de l'ouvrage à construire (Figure 80). Le noyau de base de l'IVI est donc une fenêtre de reconstruction virtuelle. Dans cette fenêtre, les utilisateurs peuvent graphiquement « glisser-déposer » des assemblages venant du modèle 3D et reconstruire l'ouvrage en mettant côte à côte les composantes dans l'ordre perçu pour la construction réelle. L'IVI permet aussi aux utilisateurs de réaliser une vérification des conflits spatiaux. L'intérêt principal de cet environnement réside dans le fait de pouvoir supporter la collaboration entre différents acteurs du projet. La collaboration est synchrone et se passe au même endroit.

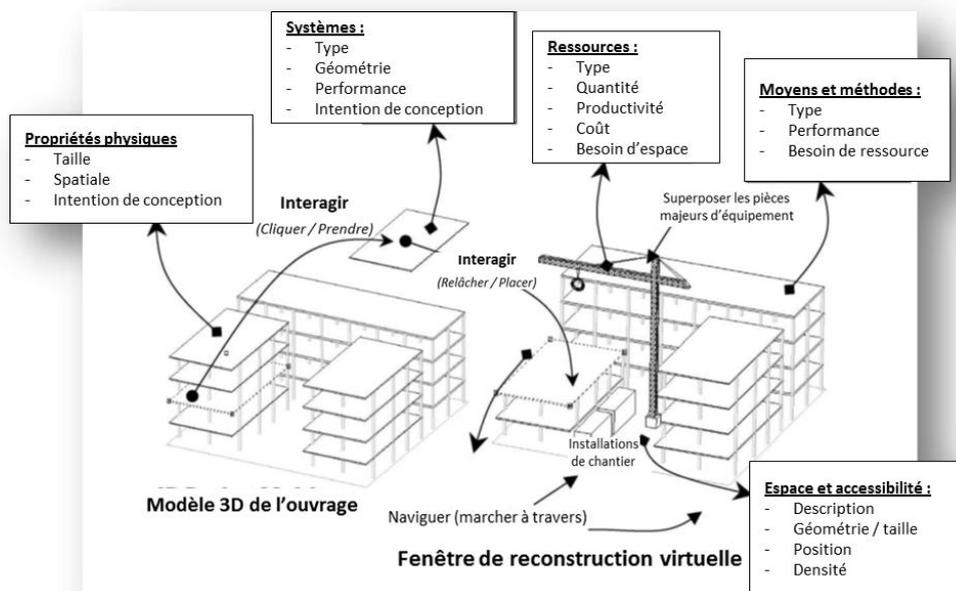


Figure 80 : L'Interface Virtuelle Interactive de Waly and Thabet (2002)

- Zhou et al. (2009) ont proposé une **méthode de définition interactive de modèle 4D**. La méthode s'appuie sur le principe d'une collaboration interactive et distribuée entre les acteurs pour la simulation 4D. Un modèle 3D est utilisé comme point de départ de la collaboration et l'occasion est donnée à des acteurs multidisciplinaires de se concentrer sur cette illustration commune de la conception (représentée par le modèle 3D) pour analyser la conception, discuter entre eux des stratégies de planification, et examiner les solutions possibles. Chacun d'eux, en fonction de son rôle, se concentre sur un aspect particulier de la planification. La méthode proposée se base sur les approches existantes de définition de la simulation 4D pour définir un workflow de collaboration interactive basé sur des sessions collaboratives. À partir de ce workflow, ils ont identifié des fonctionnalités requises pour un outil de simulation collaborative interactive (Figure 81). Un tel workflow montre qu'en fonction de leur rôle, les acteurs ont des besoins d'information différents sans pourtant une adaptation de la visualisation à ces différents besoins.

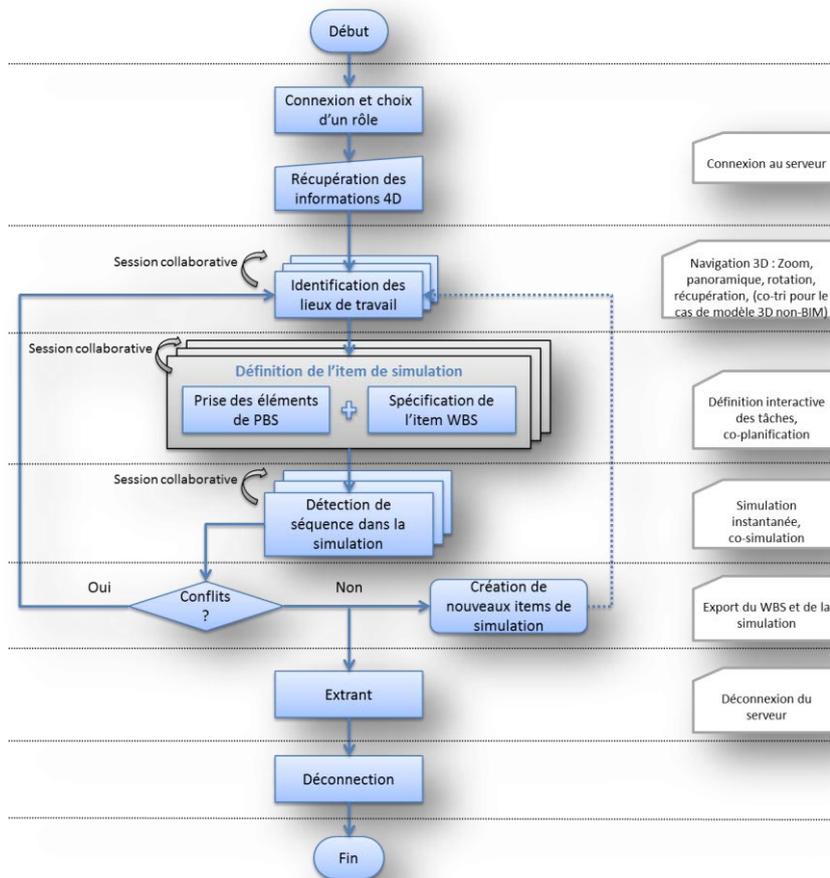


Figure 81 : Workflow de collaboration interactive proposé par Zhou et al. (2009)

Comme on l'a vu, des travaux ont été conduits pour améliorer la simulation collaborative 4D/nD. Ces travaux tentent d'améliorer les approches classiques que sont la liaison manuelle, l'automatisation et l'assemblage manuel. Il est intéressant de constater que ces travaux n'accordent pas une grande place à la visualisation qui pourtant est un aspect important de la simulation.

◆ **Retenons, avant d’aller plus loin :**

- 1) Il est possible de conceptualiser la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction et quelques exemples de travaux scientifiques existent à ce propos.
- 2) Une telle conceptualisation fait ressortir plusieurs types d’acteurs avec différents rôles.
- 3) Dans le contexte de l’activité collective, les différents acteurs manipulent le modèle 4D/nD dans un contexte physique (terminal et localisation) particulier.
- 4) Chaque acteur utilise une interface dépendant de son contexte physique et de son besoin particulier.
- 5) La visualisation étant importante dans la simulation, les vues proposées dans les interfaces devraient être adaptées aux besoins et contextes de chacun.

5.2 Raffinement de la problématique

Après le recul théorique réalisé dans les chapitres précédents et l’effort de conceptualisation fait dans la première partie du présent chapitre, nous sommes à même de raffiner notre problématique et définir plus précisément notre approche de recherche.

5.2.1 Notre problématique par rapport aux théories du TCAO

5.2.1.1 Utilité et limites des approches classiques du TCAO pour notre problématique

Dans notre recensement des systèmes de TCAO, nous avons établi que tous les systèmes ne couvrent pas tous les besoins des participants à une activité collective. L’approche généralement utilisée pour assister la collaboration dans le secteur de la construction consiste à proposer plusieurs systèmes aux acteurs pour assister leurs différents besoins. Ceci justifie l’existence des différentes classifications que nous avons présentées dans le chapitre 5 et dont le principal objectif est de définir des groupes de systèmes pour des situations de coopération données, de manière à y proposer les systèmes dont les fonctionnalités sont les plus appropriées. Guerriero (2009) a d’ailleurs recensé les outils utilisés pour la conduite de la conception dans le secteur de la construction, et les a positionnés suivant les différentes dimensions identifiées dans ces classifications. Un tel recensement, présenté à la Figure suivante, montre l’intérêt des approches classiques de TCAO dans la classification et le choix des outils pour assister l’activité collective dans la construction.

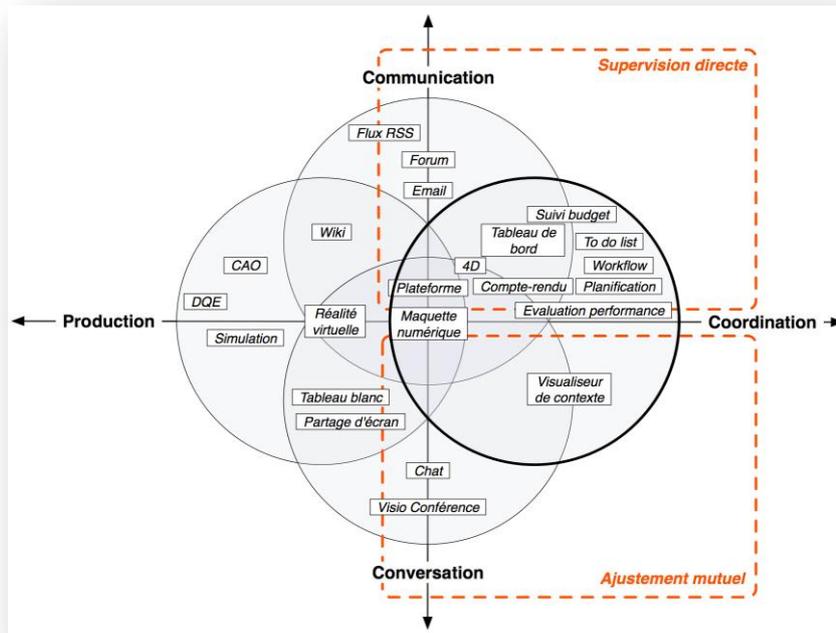


Figure 82 : Positionnement des outils utilisés lors d'une opération de construction (Guerriero 2009)

Mais notre problématique ne se rapporte pas uniquement au choix d'outils appropriés. Il nous faut, en plus de cela, proposer des représentations visuelles adaptées aux besoins de chaque acteur, en fonction de son rôle dans le contexte coopératif. Nous reprendrons donc les concepts présentés dans les métamodèles proposés dans les travaux antérieurs du laboratoire MAP CRAI pour décrire l'activité collective (acteur, activité, artefact, etc.) et nous irons plus loin en y ajoutant des éléments issus de la description des personas de collaboration.

5.2.1.2 Catégorisation des équipes de simulation collaborative de la construction

Comme nous l'avons vu, le secteur de la construction met en œuvre des organisations complexes, ce qui rend complexe la description des situations collaboratives. Ainsi, les théories classiques de TCAO ne permettent pas une description aisée de la collaboration entre les acteurs d'un projet de construction de manière à comprendre le besoin de chacun. La notion de personas collectifs permet l'identification d'un certain nombre de "types" de collaborations. Six différents types de collaboration ont été cités (Tara Matthews et al. 2011) pour catégoriser les équipes impliquées dans une activité collaborative : l'équipe de projet dynamique, l'équipe de projet stable, le comité, le groupe basé sur une relation client-fournisseur, la communauté, et les relations professionnelles (voir paragraphe 4.1.3.3 du chapitre 4). Cette catégorisation est utilisable dans le secteur de la construction, car :

- les équipes d'un chantier de construction correspondent bien à des équipes de projet dynamiques. En effet, quelques membres seulement (coordinateur, sécurité santé, etc.) participent à toute l'activité de construction tandis que les autres interviennent uniquement en fonction de leur corps de métiers et de leur rôle sur le chantier, le but commun étant l'ouvrage à construire.

- un bel exemple d'équipe de projet stable se retrouve dans le travail en agence d'architecture. En général, les acteurs (architecte, dessinateur, métreur) affectés à un projet ne changent pas durant la durée du projet. Le livrable commun est le projet architectural.
- les réunions de chantier et les discussions informelles illustrent très bien la notion de comité. En effet, il n'est pas rare que des problèmes particuliers d'ordonnancement ou des détails techniques complexes soient étudiés en réunion de chantier ou en discussions informelles. Ainsi, des acteurs sont invités, en marge de leur travail principal sur le chantier, à apporter leur expertise et leur expérience à la recherche d'une solution efficace. Le livrable commun, qui est la solution à trouver, ne constitue bien entendu pas le travail principal de la plupart des acteurs.
- l'exemple typique de groupe basé sur une relation client-fournisseur, en termes de planification, concerne la communication entre l'entreprise et les fournisseurs pour élaborer un planning d'approvisionnement cohérent. Dans ce cas, il est question de s'assurer que les matériaux seront de bonne qualité et qu'ils seront livrés aux bonnes dates. Un autre exemple intéressant est la collaboration entre le maître de l'ouvrage et l'entreprise générale (ou le maître d'œuvre) dans le but de s'entendre sur les conditions de livraison des travaux. Autre exemple, la relation entre l'entreprise générale et les sous-traitants concernant les différents corps d'état.
- les salons ou foires (comme le Salon des Bonnes Pratiques au Luxembourg, ou Bâtimat en France, etc.) sont de bons exemples de communauté dans le secteur de la construction. Mais on peut également citer les rencontres d'associations de professionnels.
- les relations professionnelles sont essentielles dans le secteur de la construction.

Des attributs ont été proposés pour décrire les types de collaboration (voir paragraphe 4.1.3.3 du chapitre 4). Malheureusement, ces attributs ne permettent pas d'établir un lien entre le rôle de chaque acteur et ses besoins d'information voire de visualisation. En fonction de nos besoins spécifiques pour le secteur de la construction, il est important de pouvoir décrire les situations collaboratives de manière à identifier non seulement les acteurs impliqués, mais aussi et surtout, leurs rôles, leurs pratiques individuelles, leurs besoins d'information et le contexte de leur activité. Il y a donc un besoin de mettre en place un formalisme propre pour la description des situations de planification collaborative dans le secteur de la construction, et correspondant au concept de simulation collaborative de la construction tel que défini dans la première partie de ce chapitre (voir Figure 78).

5.2.1.3 Limites de la visualisation collaborative

Nous voyons à travers les théories sur la Visualisation Collaborative et les différents recensements de systèmes existants que l'approche de la visualisation collaborative dans ce domaine scientifique ne correspond pas tout à fait à nos besoins. Elle y est exclusivement définie comme étant l'utilisation partagée de représentations visuelles. Même si cela fait partie de nos besoins, ils ne s'y résument pas. En effet, dans notre approche, il est question pour des utilisateurs de visualiser de manière collaborative des ensembles de données, mais il est également question de visualiser le contexte de l'activité collective. À partir de là, nous considérons la visualisation collaborative, par rapport à nos

besoins, à la somme de ces deux approches. L'adaptation de la visualisation que nous envisageons se rapporte donc à la fois à :

- la prise en compte des besoins de chaque acteur dans le cadre de la visualisation du contexte d'une activité collective ; et
- l'adaptation des vues aux besoins de chaque acteur dans le cadre de l'utilisation partagée de représentations graphiques issues d'une même collection d'information.

5.2.2 Notre problématique par rapport aux théories de visualisation

5.2.2.1 L'importance des vues métiers dans la simulation 4D de la construction

Dans notre problématique, nous avons présenté les vues métiers que nous avons définies comme étant les vues que les professionnels du secteur manipulent dans leur travail de tous les jours (paragraphe 2.2.1.2, page 87). Il faut dire que la grande partie de l'information manipulée dans un projet de construction est représentée visuellement (Tory & Staub-French 2008). Il s'agit notamment des représentations de l'ouvrage à réaliser (c'est-à-dire les dessins architecturaux, les plans d'exécution, les esquisses, les descriptifs, les modèles physiques ou numériques, etc.), des représentations liées à la planification (sous forme de forme d'un diagramme de Gantt, d'un réseau PERT, etc.) ou encore des représentations de l'information budgétaire et la planification des coûts (par exemple les devis et les bordereaux).

Tory & Staub-French ont réalisé une étude de terrain sur les techniques de visualisation utilisées pour la conception architecturale dans le secteur de la construction (Tory & Staub-French 2008). Cette étude montre que les artefacts manipulés peuvent être temporels, spatiaux, quantitatifs, symboliques ou sémantiques. Les vues métiers prennent alors la forme de graphiques temporels, de plans 2D, de modèles physiques 3D, de modèles virtuels 3D, de textes, de diagrammes, de symboles, ou de tableaux.

Ces représentations visuelles jouent un rôle essentiel dans la médiatisation de la coordination entre les acteurs impliqués (Tory & Staub-French 2008). Si les vues métiers imprimées sur papier demeurent les plus utilisées pour représenter l'ouvrage, la modélisation 3D tend à s'installer de plus en plus dans les habitudes des professionnels. La modélisation 3D, contrairement aux vues imprimées sur papier qui sont passives, propose des principes intéressants d'interaction avec les utilisateurs. Tory et Staub-French classifient ces interactions dans quatre catégories de tâches : descriptives, explicatives, évaluatives et prédictives.

En général, les professionnels ont recours à plusieurs vues métiers pour couvrir leurs différents besoins. La simulation 4D par exemple propose une vue de l'ouvrage et une vue du planning. Peut-on, dans ce cas, parler de vues multiples coordonnées ? Nous verrons à travers le paragraphe suivant que oui. Nous y verrons également que la problématique des vues multiples coordonnées nD a déjà été abordée dans le secteur.

5.2.2.2 Les Vues Multiples Coordonnées 4D/nD dans la construction

Le recul théorique sur la visualisation (Chapitre 3, page 109) nous a permis de comprendre que les vues multiples coordonnées (CMV) utilisent, pour l'accomplissement d'une tâche unique, deux ou plusieurs vues séparées contenant des informations liées. Les simulations nD peuvent être considérées comme des systèmes de CMV dans la mesure où elles font appel à plusieurs vues dont les contenus sont liés. De manière générale, les simulations 4D/nD respectent les règles de "diversité" et de "complémentarité" énoncées par Wang Baldonado et *al.* (2000) dans la mesure où elles affichent des contenus aux attributs divers et elles mettent en évidence des corrélations entre ces contenus. Dans une simulation 4D, les éléments de l'ouvrage de la vue 3D sont liés aux tâches de construction correspondantes de la vue Planning. Dans l'utilisation des vues multiples coordonnées, des portions similaires ou différentes de l'information peuvent être affichées par des vues différentes et ces vues étroitement coordonnées de diverses manières de telle sorte que l'interaction sur une composante cause des effets significatifs dans les autres. La coordination garantit que les changements dans une vue sont propagés dans toutes les autres, maintenant ainsi la cohérence des données analysées. Kubicki (2006) a d'ailleurs proposé une bonne illustration du principe de simulation nD dans laquelle des éléments des différentes vues sont reliés entre eux pour la coordination des vues multiples avec une approche d'asservissement (Figure 83).

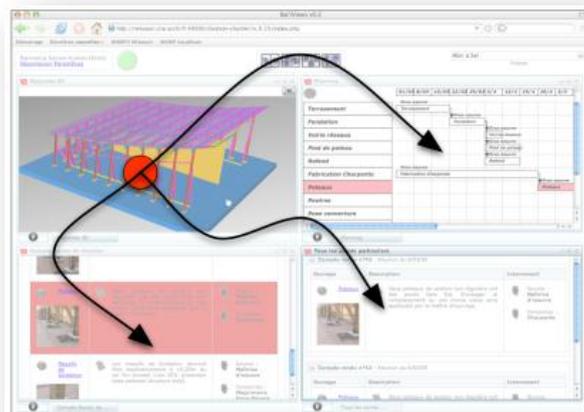


Figure 83 : Exemple de liaison d'éléments de vues différents dans une simulation nD de la construction (Kubicki 2006)

Deux autres alternatives de coordination de ces mêmes vues ont été proposées : la liaison hiérarchique (Figure 84) et la liaison « libre » (Figure 85).

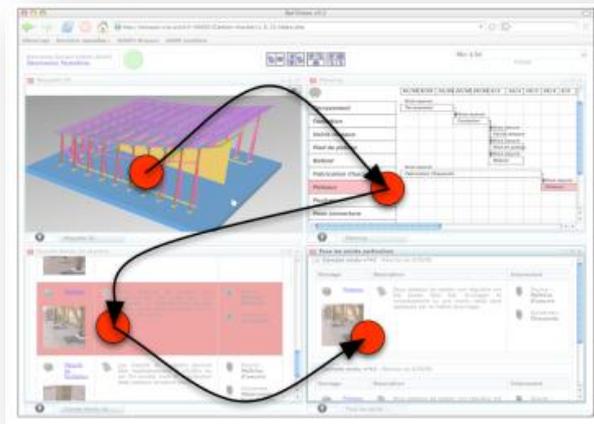


Figure 84 : Exemple de liaison hiérarchique d'éléments de vues différents dans une simulation nD (Kubicki 2006)

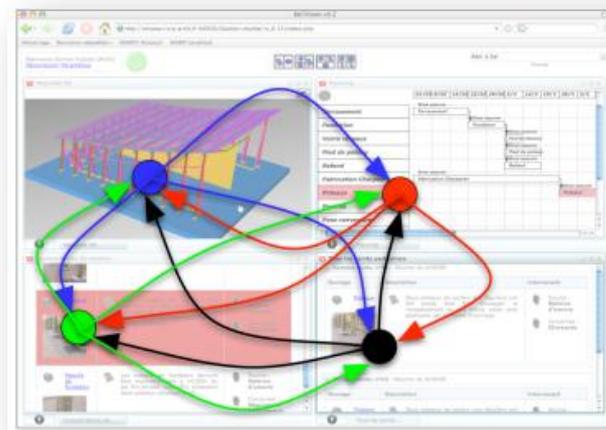


Figure 85 : Exemple de liaison « libre » d'éléments de vues différents dans une simulation nD (Kubicki 2006)

Si ces exemples de vues multiples sont fort intéressants et s'ils illustrent bien le besoin de plusieurs vues métiers complémentaires et coordonnées, ils ne découlent pas d'une méthode de conception formalisée et structurée faisant le lien entre les pratiques des acteurs, leurs besoins de visualisation et les mécanismes de coordination.

5.2.2.3 Critiques des modèles de coordination de vues multiples

Dans le chapitre sur les théories de visualisation et les vues multiples coordonnées, nous avons présenté la taxonomie de North et Shneiderman (1997) pour la coordination des vues multiples. Cette taxonomie présente des catégories d'éléments qui donnent une idée assez générale des objets à lier (items, vues). Ces éléments sont évidemment très intéressants lorsque l'on se situe à un niveau d'abstraction élevé. Mais elle ne présente pas les propriétés importantes pour décrire et instancier les items ni les vues. Pour pouvoir utiliser les concepts intéressants de cette taxonomie par rapport à notre problématique, il est nécessaire de proposer de telles propriétés permettant de décrire non

seulement les vues, mais aussi les items correspondant au contenu à visualiser. Ces propriétés ne seront bien entendu pas inventées, mais devront provenir des théories sur la visualisation.

Nous avons également présenté le modèle abstrait de Boukhelifa et Rodgers (2003) pour la coordination en visualisation exploratoire. Ces auteurs proposent également un prototype (CViews) et un modèle conceptuel UML de la coordination des vues dans ce prototype. Ce modèle conceptuel présente des propriétés et les opérations applicables aux différentes classes, ce qui montre qu'un système de vues multiples coordonnées peut parfaitement être décrit en utilisant un modèle UML. Mais si le lien entre le modèle abstrait et le modèle UML est visible, il est difficile de considérer le modèle UML comme étant une instanciation du modèle abstrait. Il faut rappeler que ce modèle abstrait s'articule autour d'événements de coordination entre des vues à travers des "objets de coordination" utilisant des fonctions et des mécanismes de notification (voir paragraphe 3.2.3.3, page 136). Les propriétés de ces objets n'étant pas clairement structurées, il nous semble nécessaire d'aller plus loin en proposant un métamodèle de vues multiples coordonnées, de sorte que chaque modèle de vues multiples coordonnées soit une instanciation de ce métamodèle, conformément aux principes de l'IDM.

5.3 Bilan du chapitre

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons tenté de conceptualiser la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction. À cet effet, nous avons rappelé la définition et les étapes d'une simulation et établi le lien entre simulation et visualisation. La compréhension des notions importantes sur la collaboration et les contextes de l'activité collective dans le secteur de la construction nous ont permis d'adapter les théories générales sur la simulation collaborative, afin de ressortir les principales composantes du concept de simulation collaborative 4D/nD de la construction.

Cette conceptualisation, ajoutée au recul théorique réalisé dans les chapitres précédents, nous a permis de raffiner notre problématique dans la deuxième partie. Nous avons ainsi pu la reformuler par rapport aux théories de TCAO et de visualisation. L'utilité et les limites des approches de TCAO ont été développées ainsi que la catégorisation des équipes de simulation collaborative de la construction en utilisant les personas de collaboration. Nous avons aussi précisé l'importance des vues métiers et les limites de la visualisation collaborative pour décrire notre problématique, et enfin critiqué les modèles existant pour la coordination des vues multiples.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la méthode que nous proposons pour concevoir des vues multiples nD coordonnées adaptées aux besoins des différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D/nD de la construction.

**MÉTHODE DE CONCEPTION DE VUES MULTIPLES ADAPTÉES DANS LE
CADRE DE LA SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND DE LA CONSTRUCTION**



*“Make sure you visualize what you really want,
not what someone else wants for you.”*

Jerry Gillies

6 Méthode de conception de vues multiples adaptées dans le cadre de la simulation collaborative 4D/nD de la construction

Nous présentons dans ce chapitre une méthode pour concevoir des vues multiples coordonnées nD adaptées aux besoins réels des différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D/nD. Nous décrivons dans un premier temps la méthode. Ensuite, nous présentons l'approche de modélisation, le formalisme et les métamodèles permettant de l'utiliser. Pour chaque métamodèle, nous rendons compte du processus itératif ayant conduit à sa construction, sa consolidation et sa validation.

6.1 Une méthode de conception de vues multiples nD adaptées

6.1.1 Positionnement de la méthode proposée

Avant de présenter la méthode proposée, il est important de montrer comment elle se positionne par rapport aux travaux antérieurs du CRAI et ceux portant sur la visualisation 4D/nD dans le secteur.

6.1.1.1 Par rapport aux travaux du CRAI

Notre proposition s'inscrit dans la continuité d'une plus large dynamique de recherche menée au MAP CRAI, concernant les modèles et environnements numériques pour la conception en architecture. Dans ce cadre, plusieurs thèses de doctorat se sont intéressées à l'assistance de la collaboration entre les acteurs d'un projet de construction. Parmi ces thèses, nous jugeons utile de rappeler :

- la thèse d'Olivier Malcurat sur la spécification d'outil informatique pour assister le travail collaboratif dans les projets de construction (Malcurat 2002).
- la thèse de Damien Hanser portant sur la proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, avec application au domaine du bâtiment (Hanser 2003).

- la thèse de Sylvain Kubicki qui redéfinit le contexte de l'activité collective dans le secteur de la construction, à travers le concept d'ingénierie coopérative dans lequel il introduit la notion de coordination flexible de l'activité de construction (Kubicki 2006).
- la thèse d'Annie Guerriero sur la représentation de la confiance dans l'activité collective, dans laquelle elle effectue un rapprochement entre les théories sur la confiance et les outils d'assistance à la coordination (Guerriero 2009).

Ces différentes thèses s'accordent notamment sur le fait qu'avant de proposer des solutions d'assistance, il est nécessaire, mais difficile de décrire le contexte d'une activité collective dans le secteur de la construction. Des éléments de description ont été proposés et progressivement améliorés au fil des travaux. Il ressort clairement une distinction entre trois différents contextes : le contexte acteur, le contexte utilisateur et le contexte de l'activité (voir paragraphe 5.1.2.3 et Figure 77 du chapitre 5).

L'adaptation de la visualisation que nous proposons tient compte de ces trois contextes, c'est-à-dire des différents éléments permettant de décrire le contexte de l'activité collective, tels que les besoins d'information de chacun des acteurs, le contexte acteur (dimensions cognitives) et le contexte utilisateur (dimensions techniques, ergonomiques, etc.).

En effet, chaque acteur impliqué dans une situation collaborative y prend part avec ses connaissances et des prédispositions cognitives externes au projet. Ces connaissances et prédispositions (qui peuvent être le fruit de son expérience, de son éducation, etc.) déterminent, consciemment ou non, la manière qu'il a d'appréhender le projet. En fonction du rôle qu'il joue, il a des besoins d'information liés au contexte de l'activité collective (activités, autres acteurs, documents, objectifs, etc.). Les vues qu'il manipule dans le cadre de l'utilisation d'un outil informatique d'assistance à la collaboration doivent donc être proposées en tenant compte de ces différents besoins. La figure suivante résume le positionnement de notre problématique par rapport aux trois contextes évoqués.

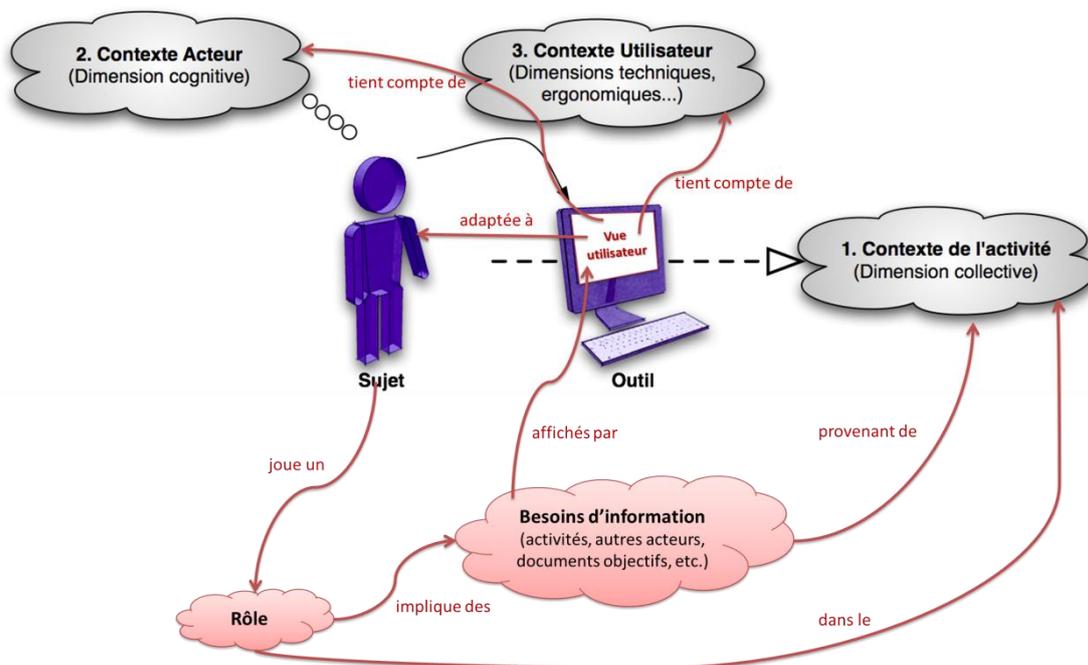


Figure 86 : Positionnement de nos objectifs par rapport aux trois contextes de l'activité collective

6.1.1.2 Par rapport au Model View Definition IFC

Avec l'essor de la maquette numérique (BIM) dans le secteur de la construction, le format IFC (Industry Foundation Classes) est de plus en plus utilisé et favorise l'utilisation de la simulation collaborative 4D/nD (voir paragraphe 2.1.3.3 du chapitre 2). Dans la mise en œuvre de ce standard, BuildingSMART recommande l'application de « *Model View Definition* » pour la structuration des échanges et des données à manipuler par les différents utilisateurs. Selon East et Chipman (2011), l'IFC est un modèle de données pour l'industrie du bâtiment, classé ISO 16739. Il couvre diverses disciplines, notamment l'architecture, l'ingénierie, la construction et l'exploitation. Ce modèle de données est partitionné et spécialisé en sous-ensembles, chacun considéré comme un *Model View Definition* (MVD). Un MVD définit un sous-ensemble du schéma IFC, ainsi que les différents échanges d'informations avec les exigences pour les données à inclure, et documente l'utilisation des structures de données adaptées à une discipline particulière (East & Chipman 2011).

L'objectif principal du MVD est en effet de trouver un équilibre utile entre les souhaits des utilisateurs et les possibilités des développeurs de logiciel, et de documenter clairement le résultat (Hietanen 2006). Il se rapporte aux échanges d'information entre différents acteurs et différentes applications, et plus particulièrement à la structuration des données à manipuler, de manière à garantir une bonne interopérabilité. En ce sens, il est intéressant pour notre problématique dans la mesure où il permet notamment de définir le format de description des données à inclure dans le modèle et leurs exigences. Car si le MVD ne traite pas réellement l'aspect relatif à la façon de décrire les techniques de représentation utilisées, il peut permettre de structurer l'information véhiculée dans la mesure où l'ISO 16739 propose un schéma conceptuel des données et un format d'échange pour le BIM.

Une interrogation intéressante concerne notre positionnement par rapport au MVD. Il faut dire que son utilité est assez proche de celle du métamodèle de contexte coopératif proposé dans la thèse de

Kubicki (2006). Mais dans notre problématique, il est question de comprendre et de décrire non seulement la situation collaborative (y compris les besoins d'information), mais aussi les modes de représentation de l'information et les mécanismes de composition et de coordination de vues, et surtout le processus permettant de passer de l'un à l'autre.

6.1.1.3 Par rapport aux travaux proposant des vues innovantes pour le secteur de la construction

Des enjeux importants sont liés à notre problématique et parmi ces enjeux, il y a la compréhension et la description des besoins des acteurs, la proposition de vues adaptées à ces besoins, et le processus de passage des besoins aux vues adaptées.

Certains travaux se sont intéressés à l'analyse des besoins métiers en vue d'améliorer les outils de simulation 4D. C'est le cas des recherches du CIFE (*Centre for Integrated Facility Engineering*, Université de Stanford), présentées dans le chapitre 2. Une analyse des besoins des utilisateurs d'une simulation 4D (dans le cadre de leur métier) a permis au CIFE de constater que certains besoins des utilisateurs n'étaient pas couverts. Dans leur effort de comprendre ces besoins en lien avec la visualisation, ils les relient aux différents types de contenus manipulés. Les types identifiés sont : descriptifs, explicatifs et prédictifs. Deux différentes techniques de visualisation (la surbrillance et la superposition) ont alors été prototypées, évaluées et brevetées (voir détails au paragraphe 2.2.2.1 du chapitre 2). Si ces techniques ont été reprises plus tard dans plusieurs outils (logiciels), force est de constater qu'ils ne couvrent pas tous les besoins identifiés dans l'étude. Il faut dire que l'analyse des besoins est très détaillée et structurée dans les travaux du CIFE, mais les propositions en matière de visualisation n'intègrent pas une méthode globale permettant un choix indiscutable de meilleures techniques de visualisation. En effet, si on comprend l'utilité des quatre types de surbrillance et des quatre types de superposition proposés pour répondre aux besoins exprimés, l'on pourrait se demander si d'autres techniques de visualisation n'auraient pas pu être choisies. Un tel doute se justifie par le fait que la proposition du CIFE ne recense pas les techniques possibles et ne les compare pas de manière à permettre un choix objectif des techniques les plus appropriées. Le choix de ces techniques de visualisation semble donc tout à fait arbitraire, car la justification scientifique n'est pas suffisamment établie.

D'autres travaux ont proposé des visualisations innovantes, sans pour autant s'appuyer sur une justification des propositions par une analyse systématique des besoins, afin de les faire évoluer. Au nombre de ces travaux, nous pouvons citer, sans être exhaustif :

- ceux de l'université de Victoria sur des modes de visualisation comparatifs de la planification de la construction (Tory et *al.* 2013) ;
- ceux de l'université de British Columbia sur la visualisation de la construction de gratte-ciel en utilisant la planification linéaire avec une simulation 4D (Russell et *al.* 2009) ;
- ceux proposant une nouvelle conceptualisation 4D = 2D+Temps (Rischmoller & Valle 2005) ;
- ceux proposant un modèle 4D augmenté avec des photos pour le suivi de l'évolution d'un chantier de construction (Golparvar-Fard et *al.* 2009) ;

- ceux proposant un nouveau cadre conceptuel de visualisation de l'information pour le secteur de la construction (Kuo et al. 2011).

Une particularité de ces travaux réside dans le fait qu'ils proposent des modes de visualisation innovants pour le secteur de la construction. Mais le lien entre ces propositions et les besoins auxquels elles sont censées répondre n'est pas très évident. En effet, le processus de passage des besoins aux propositions n'est pas vraiment documenté. Or, une telle documentation est essentielle pour justifier que les modes de visualisation proposés correspondent effectivement aux besoins exprimés plutôt qu'à d'autres. Et pour y arriver, il est important d'arriver à structurer les besoins et rendre transparent le passage des besoins aux propositions de visualisation.

On voit clairement qu'il y a d'un côté les travaux (comme ceux du CIFE) qui proposent une analyse très structurée des besoins des acteurs, d'un point de vue métier, sans aller très loin dans la proposition de vues innovantes ; et les recherches qui proposent des modes de visualisation innovants, mais qui ne s'appuient pas sur une description systématique des besoins identifiés. Et dans les deux cas, le processus de passage des besoins à la proposition de modes de visualisation appropriés n'est pas clairement structuré et documenté.

Nous pensons que :

- la proposition de modes de visualisation adaptés à des besoins donnés doit se faire en utilisant une méthode **structurée, compréhensible et évolutive** ;
- dans une telle méthode, il est primordial qu'aussi bien les besoins traités que les vues proposées pour y répondre soient décrits de manière **structurée** ;
- le **processus de passage** des besoins vers les vues doit être clair.

Nous proposons dans la suite une méthode pour concevoir des vues adaptées aux besoins réels des acteurs, dans le cadre d'une simulation collaborative 4D/nD de la construction.

6.1.2 Méthode de conception de vues multiples nD adaptées

6.1.2.1 Quelques aspects de la méthode proposée

Avant de présenter la méthode proposée, nous jugeons utile de présenter certains de ces aspects, afin d'aider le lecteur à bien en comprendre la logique. Parmi ces aspects, nous pouvons citer le fait que :

- la méthode s'adresse non seulement aux concepteurs/éditeurs d'outils de simulation collaborative 4D/nD de la construction, mais également à des professionnels et autres experts de la planification de la construction. L'objectif est de les guider dans l'étude des besoins des utilisateurs potentiels et de choisir les vues métiers les plus appropriées aux besoins traités. La méthode peut également conduire à la conception de vues innovantes ne correspondant pas à des vues métiers connues, mais répondant à des besoins donnés identifiés dans le cadre de l'étude d'une situation de simulation collaborative 4D/nD ;
- la méthode permet de décrire de manière structurée et évolutive les besoins, les vues, et le processus de passage des besoins aux vues. À cet effet, il fournit des formalismes clairs de description des différents concepts manipulés. Ces formalismes sont présentés sous la

- forme de métamodèles conçus et validés sur la base de plusieurs études de cas réels issus du secteur de la construction ;
- les besoins et les vues sont décrits et traités de manière claire et structurée. C'est également le cas du processus de passage des besoins au choix des vues. Pour y arriver, quatre principales étapes sont nécessaires et correspondent à une distinction entre les besoins métiers, les besoins de visualisation, le choix des vues et la composition de vues multiples. Les résultats d'une étape sont utilisés dans l'étape suivante, de manière à aboutir progressivement, à la fin de la dernière étape, à la conception de vues adaptées aux besoins identifiés dans la première étape. La pertinence de ces résultats peut ensuite être évaluée par une validation métier ;
 - la méthode proposée considère les simulations nD comme des systèmes de vues multiples coordonnées. Elle permet donc à la fois le choix de vues métiers adaptées, et les mécanismes de coordination de plusieurs vues métiers complémentaires pour répondre aux besoins d'un acteur unique.

6.1.2.2 Description de la méthode

La méthode proposée permet une étude progressive du contexte de l'activité de simulation collaborative 4D/nD, de manière à passer logiquement des besoins des acteurs identifiés à la proposition de vues adaptées à ces besoins. Une telle étude progressive permet de rendre clairement compte du processus de passage des besoins à des vues adaptées. Comme nous venons de le dire plus haut, quatre étapes importantes sont nécessaires à cet effet. Ces étapes permettent de pallier les insuffisances notées dans les travaux similaires (voir paragraphe 6.1.1.3) et garantissent notamment une évolutivité, une structuration et une compréhensibilité maximales de la méthode.

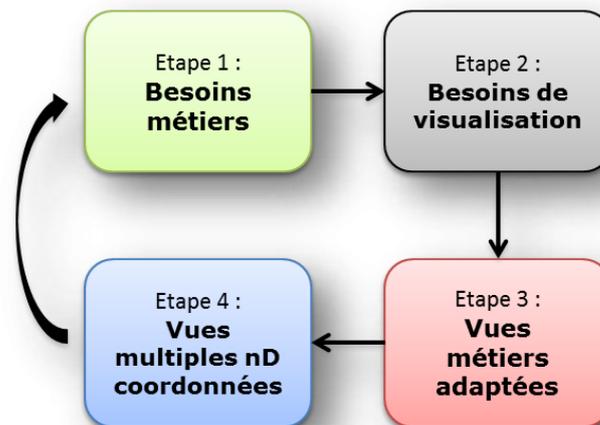


Figure 87 : Principales étapes de la méthode proposée

Nous différencions les besoins métiers (qui correspondent au contexte de l'activité) des besoins de visualisation (qui correspondent au contexte utilisateur). Si les besoins métiers découlent principalement du rôle joué par l'acteur dans le contexte de l'activité collective, les besoins de visualisation sont quant à eux directement liés aux besoins d'information des acteurs et à l'outil qu'ils utilisent dans le contexte utilisateur.

La première étape de la méthode a pour objectif de décrire la situation collaborative et d'identifier les besoins métiers des acteurs impliqués. Les descriptions actuelles du contexte de l'activité collective (Kubicki 2006; Guerriero 2009) font ressortir des éléments de description intéressants comme les acteurs, les rôles (opérationnels, organisationnels), les documents, les artéfacts, etc. Mais ces éléments ne sont pas suffisants pour une description répondant à notre besoin particulier. En effet, il est important d'être plus précis dans la description, de manière à faire ressortir les éléments particuliers d'une situation collaborative de simulation 4D/nD de la construction, conformément à la conceptualisation que nous avons proposée dans le chapitre précédent. Ainsi, il est important de :

- décrire le groupe : la description du groupe doit permettre à la fois de comprendre le type de groupe traité et le style d'organisation. Nous convenons de faire appel ici aux théories sur les personas de collaboration pour décrire typer les types de groupe. Dans le chapitre précédent, nous avons en effet montré quelques exemples illustrant les types de groupe par des exemples issus de situations de planification de la construction (voir paragraphe 5.2.1.2, chapitre 5). Quant au style d'organisation dans les projets de construction, il a été traité dans les travaux précédents du laboratoire MAP CRAI. Kubicki (2006) a ainsi pu identifier 3 différents styles d'organisation : l'organisation de type hiérarchique, l'organisation de type adhocratique et l'organisation de type transversal. Ces types d'organisation vont notamment orienter le niveau de flexibilité dans la proposition des vues. Par exemple, dans une organisation de type adhocratique où l'ajustement mutuel est prépondérant, il est possible d'imaginer des vues reconfigurables par les acteurs eux-mêmes en fonction de leurs besoins. Au contraire, dans une organisation de type hiérarchique, les vues pourront être plus facilement imposées aux acteurs par leur supérieur hiérarchique direct.
- bien identifier les différents acteurs impliqués dans la simulation collaborative et leurs rôles. Les types de rôle doivent désormais correspondre aux types d'acteurs d'une simulation collaborative (*doer, done to, done for, done with, done without*) et non plus uniquement aux rôles opérationnels (rédacteur, lecteur, etc.) ou organisationnels (architecte, ingénieur, etc.) précédemment utilisés. Évidemment, ces rôles sont toujours nécessaires dans la description de la situation collaborative, mais à un niveau d'abstraction. En effet, deux acteurs peuvent tout à fait avoir le même rôle de *done for*, sans avoir les mêmes besoins de visualisation, car n'ayant pas les mêmes rôles opérationnels. Par exemple, dans une situation collaborative, une entreprise de maçonnerie et un coordinateur peuvent être des *done for*.
- décrire les pratiques individuelles de chacun des acteurs identifiés : en fonction du rôle qu'il joue, chaque acteur réalise une série de pratiques particulières. La connaissance de ces pratiques permet de comprendre son activité et ses besoins d'information, ce qui est primordial dans la détermination de ses besoins de visualisation ;
- anticiper le contexte physique dans lequel chaque acteur va réaliser son activité : l'objectif ici est de déterminer si l'acteur sera dans un contexte de mobilité comme c'est le cas d'un travail sur chantier (ou en déplacement), ou dans un contexte fixe (au bureau). Ceci permet également de connaître le type de terminal utilisé, car certaines vues peuvent s'avérer non pratiques sur certains dispositifs. Mieux, le type d'interaction à proposer dépendra fortement du type de terminal utilisé par l'utilisateur ;

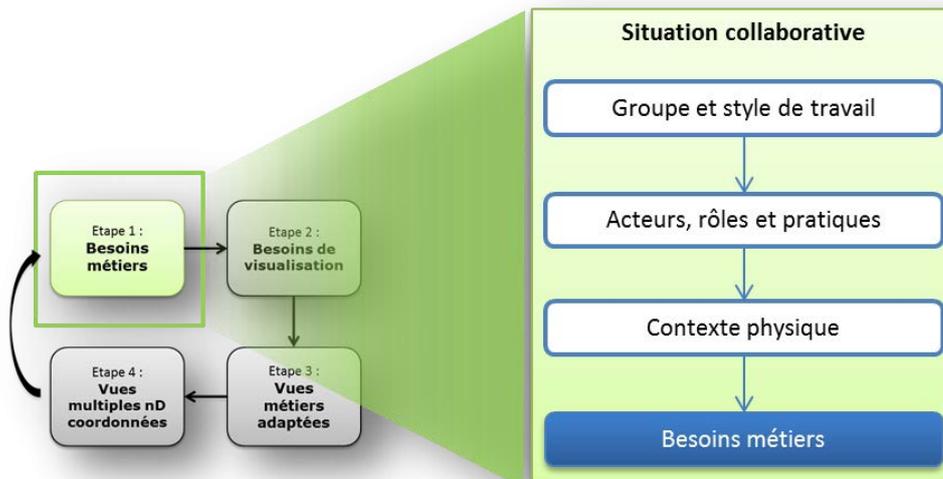


Figure 88 : Première étape : description de la situation collaborative

La deuxième étape a pour objectif de comprendre pour chaque acteur les besoins de visualisation liés aux besoins métiers identifiés à la première étape. À cet effet, il est nécessaire de :

- comprendre et structurer le contenu à visualiser. Ce contenu correspond, pour chaque acteur, aux besoins d'information identifiés à l'étape précédente de la méthode. Il est utile de préciser qu'à cette étape, les acteurs de la situation collaborative (contexte de l'activité collective) sont considérés comme étant désormais des utilisateurs d'un outil (logiciel) de simulation collaborative (contexte utilisateur). Il s'agit donc d'anticiper leurs besoins de visualisation dans le cadre de l'utilisation de cet outil ;
- recenser les vues métiers possibles pour représenter le contenu à visualiser. Pour chaque contenu à visualiser, plusieurs techniques de représentation peuvent exister. Nous avons expliqué plus haut (paragraphe 2.2.1.2, chapitre 2), concernant les vues métiers, que plusieurs d'entre elles peuvent représenter la même information. Il est question ici de recenser celles pouvant représenter le contenu à visualiser correspondant à chaque besoin d'information identifié. Ce recensement se fait dans une base de données de vues métiers. En effet, nous avons réalisé une base de données qui répertorie les vues métiers connues. Elle est donc constamment alimentée, à chaque fois qu'une nouvelle technique de représentation est identifiée dans la littérature ou à travers une étude de cas. Les vues étant décrites suivant le même formalisme (correspondant au métamodèle de vue métier présenté plus bas), il est possible de réaliser des filtres dans la base de données et en faire ressortir celles correspondant à un contenu particulier ;
- d'anticiper les tâches de visualisation de l'utilisateur. La compréhension des besoins de visualisation des utilisateurs demande aussi l'identification des tâches analytique de visualisation qu'ils ont à réaliser avec les vues. Il s'agit là d'un critère essentiel dans le choix des vues métiers appropriées, car elles détermineront le niveau d'adaptation d'une vue par rapport à une autre. En effet, si deux vues peuvent afficher une même information, l'une peut s'avérer plus intéressante que l'autre pour supporter une tâche de visualisation précise de l'utilisateur.

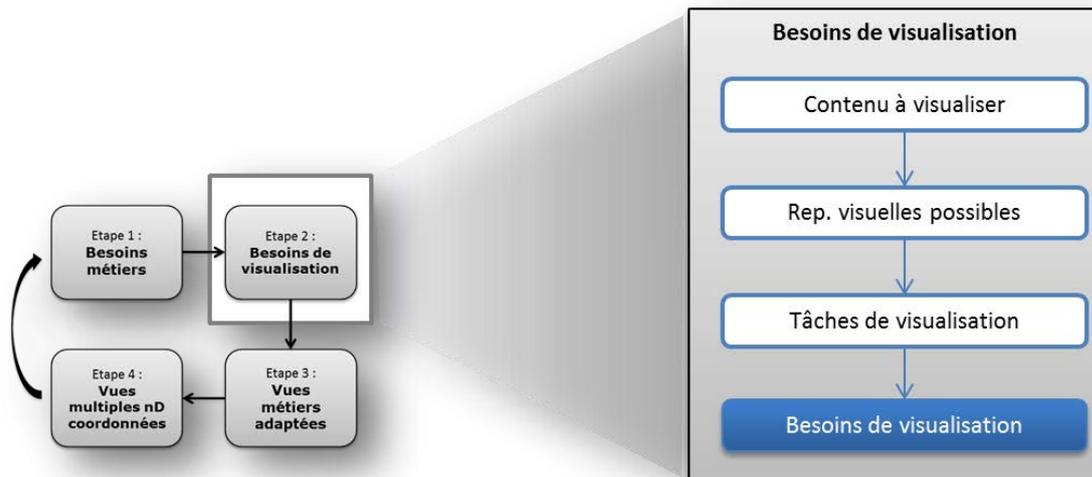


Figure 89 : Deuxième étape : identification des besoins de visualisation

La troisième étape a pour objectif comparer les vues métiers possibles recensées à l'étape précédente et d'en choisir les plus adaptées aux besoins de visualisation identifiés. Il est donc important de pouvoir :

- décrire les vues métiers possibles. Pour être capable de comparer deux vues, il est essentiel de pouvoir les décrire suivant un même formalisme. Il est ainsi possible de faire une comparaison équitable suivant des aspects différents. Dans le recul théorique que nous avons effectué vers la Visualisation de l'Information (chapitre 3), nous avons montré que pour comprendre une représentation visuelle, il est notamment important de comprendre la nature et la structure des données qu'elle permet de représenter, la structure de représentation utilisée, les éléments graphiques mis en œuvre ainsi que les formes d'interaction qu'elle permet. Ces aspects entrent en ligne ici dans la description des vues métiers et nous proposons à cet effet un métamodèle que nous présenterons plus loin ;
- de comparer les vues métiers possibles. Une fois que les vues métiers possibles sont décrites, elles peuvent être comparées. Cette comparaison est faite à la lumière des besoins de visualisation de l'utilisateur. Il s'agit plus précisément d'évaluer dans quelle mesure chaque vue métier répond au besoin de l'acteur suivant les différents critères (technique de représentation, contenu affichable, principes d'interaction supportés, tâches de visualisation gérées).
- de sélectionner les vues métiers les plus adaptées. La description et la comparaison des vues métiers permet d'attribuer une note finale (score) à chaque vue métier. Ce score est la résultante des notes obtenues par la vue métier au regard des critères de description (technique, contenu, interaction, tâches de visualisation). Cela permet de comparer les scores finaux et de choisir la vue métier ayant obtenu le meilleur score et donc considérée comme étant la plus appropriée pour le besoin de visualisation traité. Nous montrerons plus loin la formule proposée pour l'attribution des scores (paragraphe 6.2.5.1).

À la fin de la troisième étape, un ensemble des vues métiers adaptées est choisi pour chaque acteur en fonction de ses différents besoins de visualisation.

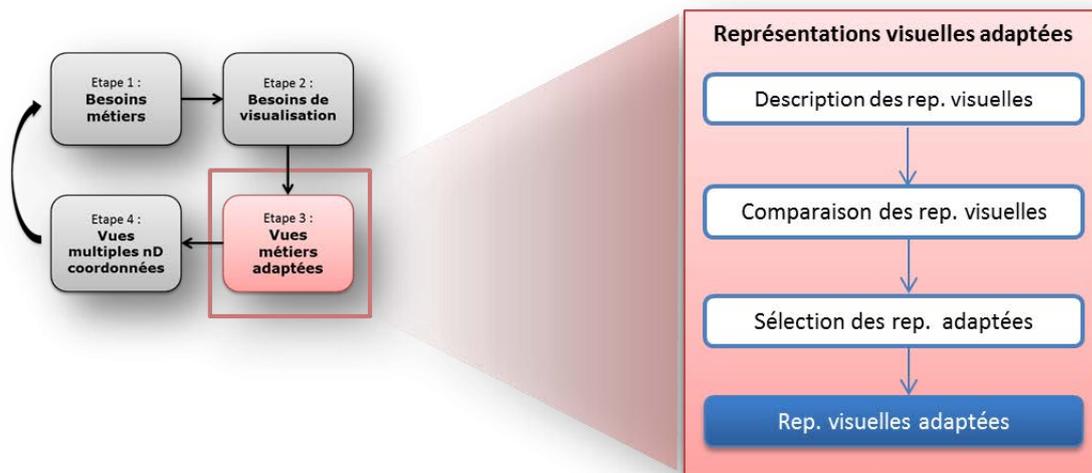


Figure 90 : Troisième étape : choix des vues métiers adaptées

La quatrième étape a pour objectif de composer des vues multiples coordonnées 4D/nD adaptées aux besoins de chaque acteur. Cette étape se justifie par le fait qu'à la fin de l'étape précédente, plusieurs vues complémentaires sont choisies pour chaque acteur, chacune des vues correspondant à un besoin d'information. Il est donc nécessaire de présenter ces vues à l'utilisateur, en les coordonnant de manière à rendre cohérente leur complémentarité pour supporter les besoins de l'utilisateur. Ainsi, un accent doit être mis sur :

- la définition de bons mécanismes de coordination des vues : il est clair que les informations représentées par les différentes vues sélectionnées pour un acteur donné peuvent différer. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 (paragraphe 3.2.1.1), les données d'une vue peuvent être des sous-ensembles des données d'une autre vue, ou bien des agrégats de valeurs individuelles des données d'une autre vue, ou encore contenir des informations entièrement différentes. Quoi qu'il en soit, il est important de définir des mécanismes de coordination des vues permettant de gérer leur diversité et/ou leur complémentarité, afin de garantir à l'utilisateur une cohérence d'utilisation et une mise en évidence facile des diverses relations entre elles.
- Le choix de principes d'interaction adaptés aux tâches de l'utilisateur et en tenant compte de son contexte physique. Les techniques d'interaction choisies doivent donner la possibilité à l'utilisateur de naviguer à travers les vues et de manipuler les données de manière à faire correspondre le contenu de la vue à la tâche de visualisation qu'il réalise.
- la spécification des vues multiples coordonnées appropriées pour chaque acteur sur la base des vues métiers sélectionnées, les mécanismes de coordination définis et les principes d'interaction choisis. Nous présenterons plus loin le métamodèle de vues multiples coordonnées que nous avons élaboré pour supporter cette étape. Ce travail de spécification doit également mettre l'accent sur l'optimisation de la ressource

espace/temps et la gestion de l'attention de l'utilisateur, notamment par l'utilisation d'éléments graphiques et d'attributs rétinien pertinents.

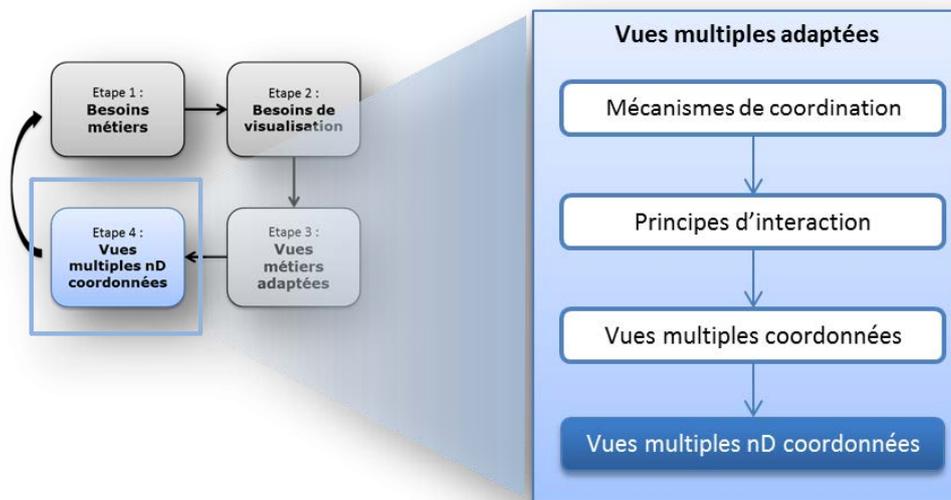


Figure 91 : Quatrième étape : composition de vues multiples coordonnées

À la fin de la quatrième étape de la méthode, des vues multiples 4D/nD sont spécifiées. Une évaluation de leur pertinence par des acteurs du domaine métier est utile. Ceci permet de s'assurer que les besoins métiers identifiés sont effectivement bien couverts par les vues multiples proposées. Une telle évaluation peut prendre la forme d'une validation par des professionnels des vues spécifiées, ou d'une série d'expérimentations sur des prototypes d'outils développés.

6.1.2.3 Approche de modélisation et formalisme pour la méthode

Pour rendre opérationnelle la méthode proposée, nous utiliserons des recommandations de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). L'IDM est une approche de développement logiciel mettant l'accent sur la création et l'exploitation de modèles de domaine en tant que représentations abstraites de la connaissance et des activités d'un domaine d'application particulier (Favre et al. 2006). Le premier élément du langage de l'IDM est le système. En effet, l'IDM considère que « tout est système » et illustre cette assertion par trois différents types de système que sont le système physique, le système numérique et le système abstrait.

La notion de modèle est liée à la relation *ReprésentationDe* pour traduire le fait qu'il s'agit d'une « abstraction d'un système modélisé, construit dans une intention particulière » (Favre et al. 2006). Pour illustrer cette relation, Favre et al. (2006) donnent l'exemple d'une carte géographique qui peut être une représentation d'une région géographique. Selon eux, la description d'un système par un modèle doit se faire dans un langage bien défini. À cet effet, l'utilisateur de métamodèles est nécessaire. Un métamodèle est défini comme étant un modèle définissant le langage d'expression d'un modèle. La notion de métamodèle est donc liée à la relation *EstConformeA* ; « ceci permet de s'assurer d'un point de vue théorique, mais surtout opérationnel qu'un modèle est correctement construit et donc qu'il est envisageable de lui appliquer des transformations automatisées » (Favre et al. 2006).

Pour définir une approche de modélisation cohérente, l'*Object Management Group* (OMG) ⁷ propose d'utiliser le standard MOF (*Meta-Object Facility*) dont l'architecture présente quatre niveaux différents :

- le niveau M3 qui est celui du méta-métamodèle MOF. Ce méta-métamodèle sert à décrire la sémantique des métamodèles ;
- le niveau M2 qui est celui des métamodèles. Les métamodèles servent à décrire la sémantique des modèles ;
- le niveau M1 qui est celui des modèles. Les modèles permettent de décrire le monde réel ;
- le niveau M0 qui est celui du monde réel, décrit avec les modèles.

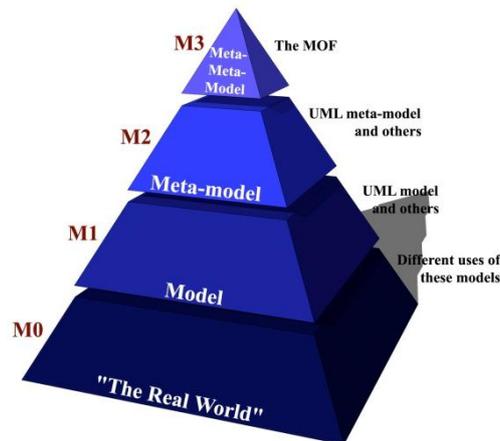


Figure 92 : l'architecture du Meta-Object Facility (MOF)

Dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode que nous proposons, nous utilisons trois niveaux de modélisation :

- Le niveau M2 est celui des métamodèles proposés pour supporter la méthode. Ces métamodèles sont réalisés en utilisant le formalisme UML. Le formalisme UML (*Unified Modeling Language*) est un langage de modélisation standardisé d'usage général en génie logiciel orienté objet. Créé et géré par l'OMG, il utilise un ensemble de techniques de notation graphique pour créer des modèles visuels de logiciels orientés objet. Dans sa version 2.0, le formalisme UML utilise 13 types de diagramme dépendants se complétant pour modéliser un projet logiciel et classifié en 3 groupes à savoir les diagrammes structurels ou statiques, les diagrammes comportementaux, et les diagrammes d'interaction ou dynamiques. La modélisation avec UML permet ainsi de représenter les éléments d'une architecture logicielle tels que l'activité, les acteurs, les processus, les schémas de base de données, les composants logiciels, et la réutilisation de composants.
- Le niveau M1 est celui des modèles réalisés conformément aux métamodèles du niveau M2. Plusieurs modèles peuvent être conformes à un même métamodèle et représenter des instances différentes du système modélisé. Pour faciliter la compréhension et éviter toute confusion, nous convenons de représenter les modèles du niveau M1 par des tableaux. Des éléments graphiques tels que les flèches peuvent être ajoutés à ces

⁷ <http://www.omg.org>

tableaux pour représenter des relations entre leurs contenus. Chaque tableau du niveau M1 est une instanciation d'un métamodèle du niveau M2 et constitue une représentation d'un concept ou un système réel (situation collaborative, vue métier, etc.).

- Le niveau M0 correspond à celui du système réel représenté par les modèles du niveau M1. Dans le cas des vues utilisateurs, les maquettes peuvent témoigner de cette réalité. Pour chaque modèle de vue du niveau M1 par exemple, il est donc possible de proposer une maquette au niveau M0.

6.2 Métamodèles supportant la méthode

Nous présentons ici les métamodèles du niveau M2, proposés pour supporter les différentes étapes de la méthode. Pour chaque métamodèle, nous rendons compte du processus itératif ayant conduit à sa construction, et nous le présentons en détail. Nous présentons également le lien entre les différents métamodèles, de manière à montrer toute la cohérence de leur conception dans notre argumentation.

6.2.1 Le métamodèle de situation collaborative

6.2.1.1 Processus de construction du métamodèle

Pour décrire les situations collaboratives à la première étape, nous proposons un métamodèle de situation collaborative. Initialement, il n'était pas question de proposer un métamodèle de situation collaborative. En effet, au tout début de notre proposition, nous avons convenu d'utiliser des diagrammes de séquence pour décrire la situation collaborative. Mais ces diagrammes ont très vite montré leur limite. La fragmentation caractérisant le secteur et le fait que les projets mettent en place des situations collaboratives uniques rendent quasi-impossible la définition d'une trame de diagramme de séquence répondant à toutes les situations.

Nous avons alors envisagé d'utiliser le métamodèle de contexte coopératif issu des travaux du laboratoire CRAI. Ce métamodèle, dont une version récente est décrite dans la thèse de Guerriero (Guerriero 2009), semblait beaucoup plus adapté pour décrire les situations collaboratives dans le secteur. Mais lorsque nous avons tenté de décrire des situations de simulation collaborative 4D/nD réelles à la lumière de notre problématique, nous nous sommes rendu compte que ce métamodèle ne répondait pas vraiment à nos besoins de faire ressortir les éléments liés à l'adaptation de la visualisation, notamment en ce qui concerne les formats de données correspondant aux besoins de visualisation des acteurs impliqués ou encore les types de groupe (à différencier du style de travail). Les travaux plus récents du CRAI sur l'identification et la description des « pratiques collaboratives » dans le secteur de la construction (Zignale et al. 2011) nous ont paru plus appropriés. Malheureusement, ces travaux étaient encore en cours et les propositions n'étaient pas encore assez stables pour que nous les utilisions. Par contre, les recherches (récentes aussi) sur les personas de collaboration proposaient des types de collaboration et des propriétés assez pertinentes pour nos besoins.

Nous avons donc décidé de prendre, de manière pragmatique, les éléments précis de ces différentes recherches qui permettent de répondre à nos besoins. Sur la base de ces éléments complémentaires, une première version de métamodèle de situation collaborative a été construite. Le métamodèle s'est progressivement amélioré au fil de son utilisation pour décrire différentes situations collaboratives réelles.

6.2.1.2 Version finale du métamodèle de situation collaborative

En fonction de notre problématique et de nos besoins, le métamodèle considère qu'une situation collaborative implique plusieurs acteurs réalisant des pratiques individuelles liées à leur rôle dans le contexte. En dehors de son rôle, un acteur a un métier et des préférences qui peuvent être liées à sa profession ou à son profil psychologique. Une pratique individuelle a lieu dans un contexte physique et, pour la réaliser, l'acteur a un certain besoin d'information.

En reprenant à notre compte des éléments de la thèse de Kirsch Pinheiro (Kirsch Pinheiro 2006), nous décrivons (de manière très pragmatique) le contexte physique par la localisation de l'acteur (bureau, chantier, mobilité) et le support matériel qu'il utilise (ordinateur, smartphone, tablette numérique, etc.).

Le besoin d'information a un nom et un format des données. Nous retenons une liste de types de données issue de l'état de l'art (voir paragraphe 3.1.2.1 du chapitre 3), notamment celle proposée par Shneiderman (1996).

Pour décrire une situation collaborative, il est important de préciser le type de groupe, le style de travail, la matrice spatio-temporelle et la taille du groupe. Les types de groupe utilisés sont ceux provenant des personas de collaboration dont nous avons montré, dans le paragraphe 5.2.1.2, l'intérêt pour catégoriser les équipes de simulation collaborative de la construction. Les styles de travail quant à eux proviennent des travaux précédents du laboratoire MAP-CRAI, notamment de la thèse de Kubicki (2006) présenté plus haut (voir Figure 76, page 179). La matrice spatio-temporelle, étudiée dans les théories sur le travail collaboratif assisté par ordinateur (paragraphe 4.1.2.2 du chapitre 4) positionne les acteurs impliqués dans le temps (synchrone, asynchrone) et l'espace (même lieu, lieux différents).

Les classes du métamodèle de situation collaborative utilisent ces différentes notions (Figure 93).

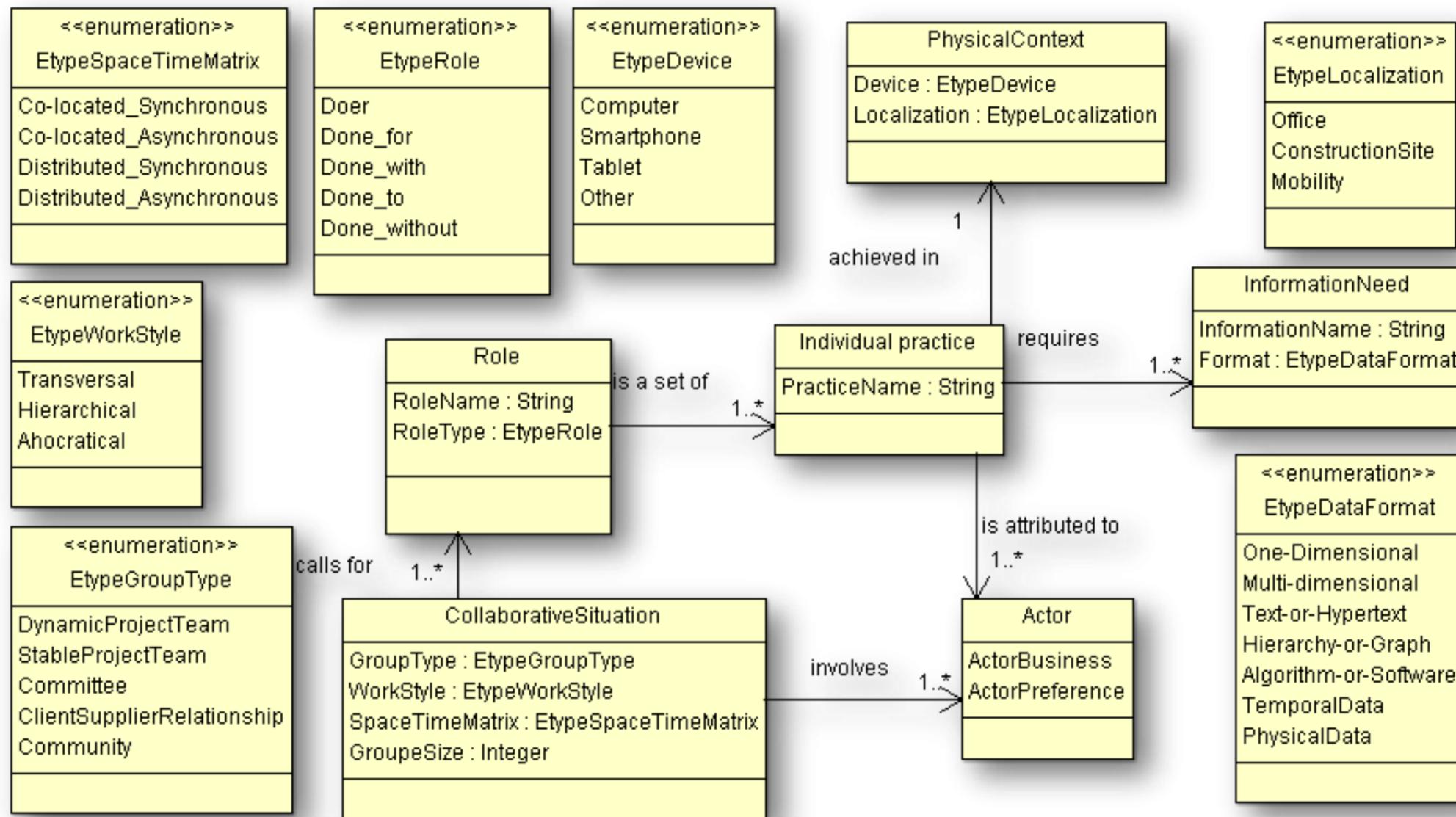


Figure 93 : Métamodèle de situation collaborative

6.2.2 Le métamodèle de tâches de visualisation

6.2.2.1 Processus de construction du métamodèle

Le but de ce métamodèle est de fournir un formalisme unique de description des tâches de visualisation, nécessaire à l'étape 2 de la méthode proposée. Pour sa conception, nous avons dans un premier temps réalisé une revue littéraire à propos des tâches de visualisations dans le champ de la visualisation de l'information. Il s'agit des tâches analytiques et exploratoires que l'utilisateur peut vouloir ou avoir besoin de réaliser sur les données qu'il visualise (Valiati et al. 2006). L'étude de différentes propositions présentées dans le paragraphe 3.1.3.2 du chapitre 3 (Wehrend & Lewis 1990; Winckler et al. 2004; Valiati et al. 2006; Tory & Moller 2004; Chuah & Roth 1996) nous a amené à construire une première version de métamodèle de tâches de visualisation en nous basant sur la taxonomie de Valiati et al (2006) qui nous semblait la plus complète. Un autre intérêt de la taxonomie de Valiati réside dans le fait qu'elle proposait, non seulement une catégorisation des tâches, mais aussi les objets auxquels ces tâches s'appliquent (voir paragraphe 3.1.3.2 du chapitre 3). Cette première version considérait un seul niveau de tâches élémentaires, issues de la taxonomie de Valiati et ne prenait pas en compte leur ordre.

La série d'entretiens avec des professionnels du secteur luxembourgeois de la construction (voir annexe 1) a été l'occasion d'identifier quelques besoins réels issus du métier. En essayant d'utiliser le métamodèle de tâches de visualisation pour décrire ces besoins, nous nous sommes rendu compte que l'ordre dans lequel les tâches étaient réalisées était indispensable et qu'il fallait en tenir compte dans leur description. De plus, il manquait un niveau de regroupement de ces tâches qui rendrait compte du type de besoin analytique lié au métier de l'utilisateur. Ce constat nous a poussé à retourner vers la littérature du domaine de l'architecture, l'ingénierie et la construction, pour identifier les types de besoins analytiques et exploratoires des acteurs des projets de construction. Tory et Staub-French ont identifié quatre catégories de tâches réalisées par les professionnels de la construction dans le cadre de l'utilisation de vues métier : les tâches descriptives, les tâches explicatives, les tâches évaluatives et les tâches prédictives (Tory & Staub-French 2008). Ces tâches correspondent à peu près aux types de contenus identifiés par Liston : descriptifs, explicatifs, prédictifs (Liston 1999).

Une nouvelle version du métamodèle a été réalisée et intègre les tâches de visualisation métier, considérées comme étant des ensembles de tâches de visualisation élémentaires. Cette nouvelle version est alors réutilisée pour décrire des cas réels, avec des ajustements au fil des cas jusqu'à l'obtention de la version stable présentée ci-dessous.

6.2.2.2 Version finale du métamodèle de tâches de visualisation

Le métamodèle proposé pour formaliser la description des tâches de visualisation identifie deux types différents de tâches : les tâches de visualisation métiers et les tâches de visualisation simples. Les tâches de visualisation métiers sont directement reliées à des besoins liés au rôle de l'utilisateur. Les quatre types de tâche de visualisation métier retenus sont : les tâches descriptives, les tâches explicatives, les tâches évaluatives et les tâches prédictives. Chacune d'elle peut être décomposée en plusieurs tâches de visualisation simples :

- comparer : l'utilisateur peut comparer des dimensions, des items, des données, des clusters, des propriétés, des proportions, des positions ou des emplacements, des distances, des primitives graphiques ;
- identifier : l'utilisateur peut identifier des clusters, des corrélations, des catégories, des propriétés, des patrons, des caractéristiques, des seuils, des similarités, des dépendances, des interdépendances, des incertitudes, des variations ;
- visualiser : l'utilisateur peut visualiser des dimensions, des items, des données, des paramètres de domaine, des informations d'attribut, des métadonnées ;
- déterminer : l'utilisateur peut déterminer une moyenne, un entier, une médiane, une variance, un écart-type, une amplitude, un centile, une somme, une proportion, une différence, un coefficient de corrélation, une statistique, etc. ;
- localiser : l'utilisateur peut localiser un item, une donnée, une valeur, un cluster, une propriété, une position ou une localisation, une distance, une primitive graphique ;
- configurer : l'utilisateur peut configurer une classification, un filtrage, un zoom, un ordre de dimension, un attribut dérivé, une primitive graphique, une normalisation ;
- déduire : l'utilisateur peut déduire une hypothèse, une règle, une probabilité, une tendance, une relation de cause à effet.

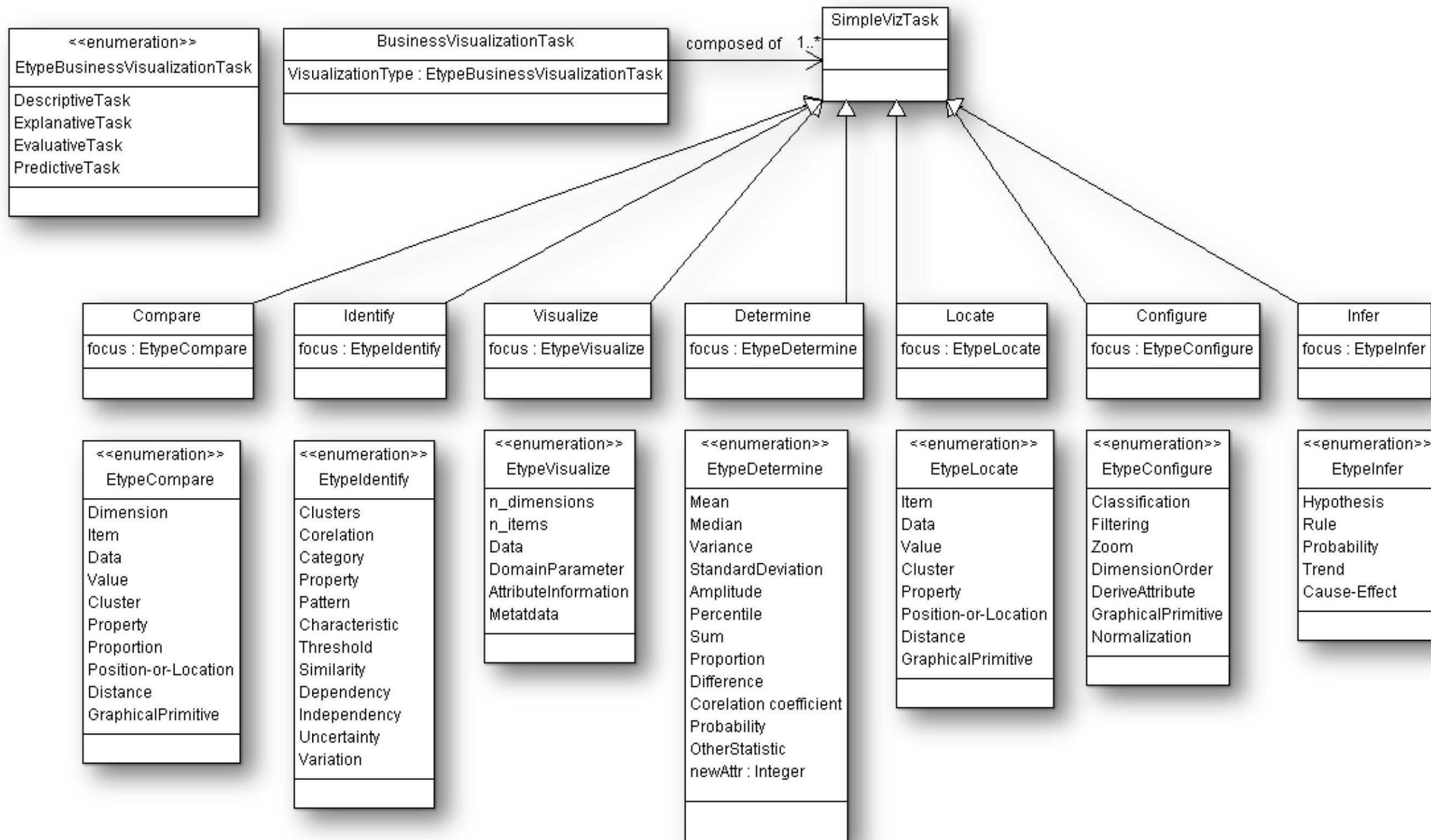


Figure 94 : Métamodèle de tâches de visualisation

6.2.3 Le métamodèle de vue métier

6.2.3.1 Processus de construction du métamodèle

Le but du métamodèle de vue métier est de permettre une description structurée des vues métiers. À cet effet, nous avons exploré la bibliographie en visualisation de l'information (voir les paragraphes 3.1.2.1, 3.1.2.2 et 3.1.3.2 du chapitre 3), avec notamment les éléments graphiques (Bertin 1967; Mazza 2009), les propriétés graphiques (Mazza 2009; Spence 2007; Healey 1992), les structures de données (Keim 2002; Shneiderman 1996; Chi 2000), les mécanismes d'interaction (Spence 2007; Winckler et al. 2004; Chi & Riedl 1998). Une première version du métamodèle a alors été proposée. Cette version considère une vue métier comme affichant un contenu en utilisant une représentation visuelle à laquelle sont associés des mécanismes d'interaction.

Parallèlement à la construction du métamodèle, un effort de recensement des vues métiers utilisées dans le secteur a été entrepris. Une base de données a été créée pour recenser toutes les vues métiers rencontrées (aussi bien dans la littérature que dans les études de cas) et les décrire suivant le métamodèle. Une centaine de vues ont ainsi pu être recensées dans la base de données créée dans un premier temps avec l'outil Access et plus tard, avec l'outil de gestion d'ontologies Protégé⁸. L'exercice de description de ces vues avec le métamodèle proposé a révélé un certain nombre de limites de ce dernier. Le métamodèle ne permettait pas de décrire certains contenus complexes ne relevant pas du champ de la visualisation de l'information. C'est le cas par exemple des contenus spatiaux comme la représentation de l'ouvrage. Un retour vers le domaine scientifique de la visualisation scientifique nous a permis de retrouver des attributs intéressants pour mieux décrire ces types de données.

Une autre limite concernait la description des mécanismes d'interaction qui s'est avérée ambiguë. D'autres références en visualisation de l'information (Tweedie 1997; Keim 2002; Winckler et al. 2004) ont permis de clarifier les notions liées aux mécanismes d'interaction et de faire une distinction claire entre les notions de type d'interaction, mode d'interaction et niveau d'interactivité.

Au fil des vues métiers décrites avec le métamodèle, nous nous sommes rendu compte que le fait que la vue soit bien connue et utilisée dans le secteur constituait un critère important dans son choix et que les vues très peu connues demandent un effort d'apprentissage. Des propriétés relatives aux degrés de connaissance et d'utilisation ont donc été prévues. Les aspects liés au contenu représenté par la vue se sont révélés plus pertinents dans le métamodèle de situation collaborative et ont donc été ôtés du métamodèle de vue métier.

D'autres amendements mineurs ont progressivement été faits au fil des cas réels étudiés, jusqu'à l'obtention d'une version stable du métamodèle de vues métiers présentées ci-dessous.

6.2.3.2 Version finale du métamodèle de vue métier

Le métamodèle de vue métier considère qu'une vue métier utilise une représentation visuelle et des principes d'interaction et affiche l'information à travers des éléments graphiques et des attributs

⁸ <http://protege.stanford.edu/>

rétiniens. La représentation visuelle correspond à une structure de représentation, met en œuvre des éléments graphiques et utilise des attributs rétiniens.

Pour la description de la structure de représentation, nous faisons appel à la taxonomie de Lohse et *al.* (1994) présentée à l'alinéa 4 du paragraphe 3.1.3.1. Nous retenons ainsi les onze catégories proposées par ces auteurs (diagramme de structure, un cartogramme, une carte, un tableau, un tableau graphique, un diagramme de processus, une icône, un diagramme temporel, un diagramme réseau, une image, un graphe). Nous y ajoutons le "texte", considéré ici comme étant une structure de représentation de l'information et une ultime catégorie "autre" pour décrire des structures complexes qu'on pourrait avoir du mal à classer dans les autres catégories.

Nous reprenons les éléments graphiques énumérés que nous avons énumérés dans le paragraphe 3.1.2.2 du chapitre 3. Il s'agit du point, de la ligne, de la surface et du volume.

Nous retenons, parmi les attributs rétiniens présentés dans le paragraphe 3.1.2.3, les principaux d'entre eux qui correspondent à nos besoins précis : la taille, l'orientation, la couleur, la texture, la forme.

Certaines représentations visuelles sont plus connues/utilisées que d'autres dans le secteur. La description d'une vue métier inclut donc aussi la description du niveau auquel la représentation visuelle est connue (inconnue, peu connue, ou très connue) et utilisée (utilisée ou pas utilisée).

En ce qui concerne la description des principes d'interaction, nous nous basons sur les éléments du paragraphe 3.1.3.2 du chapitre 3. Nous différencions ainsi le niveau d'interactivité de la vue (manuel, mécanisé, enseignable, guidable, ou automatique), le mode d'interaction utilisé (continu, par étape, passif, ou composite) et le type d'interaction (projection dynamique, filtre interactif, zoom, déformation, etc.).

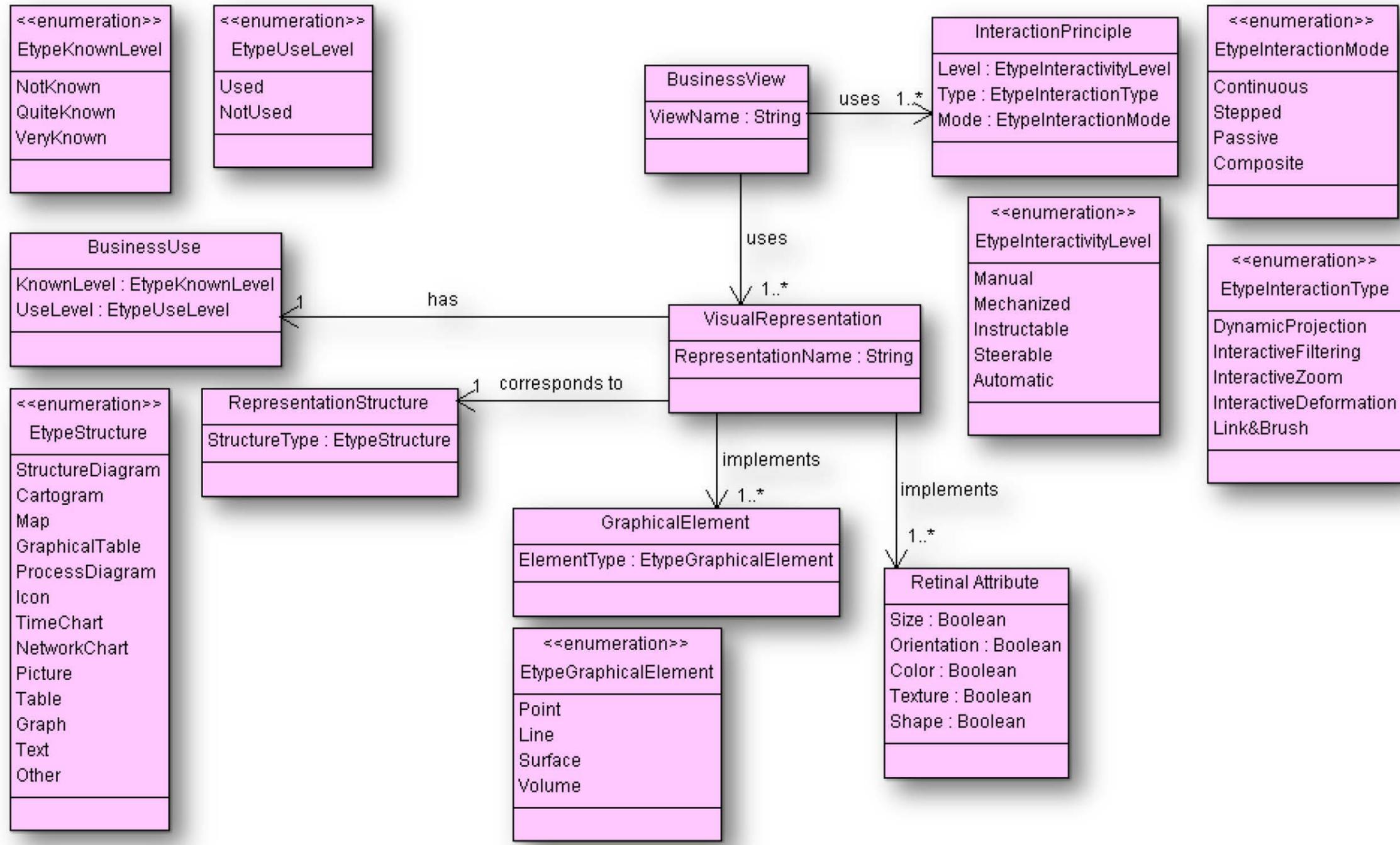


Figure 95 : Métamodèle de vue métier

6.2.4 Le métamodèle de vues multiples coordonnées

6.2.4.1 Processus de construction du métamodèle

La première version du métamodèle de vues multiples coordonnées a été construite à partir d'éléments théoriques issus de la littérature relative aux vues multiples coordonnées. Nous nous sommes notamment basés sur la taxonomie proposée par Shneiderman pour la coordination des fenêtres multiples (North & Shneiderman 1997) et les travaux de Boukheilifa et Rodgers sur la coordination de vues multiples (Boukheilifa & Rodgers 2003).

Pour la consolidation et la validation de ce métamodèle, nous avons participé à un cours de gestion de projet de construction basée sur la simulation 4D, dans le cadre du cursus d'ingénieurs à l'université de Liège. Dans le cadre de ce cours, les étudiants réalisent des simulations 4D répondant à des scénarios de planification donnés. La participation à ce cours et les interactions avec les étudiants nous ont permis de reprendre les simulations 4D intéressantes qu'ils ont réalisées et de les décrire en tant que systèmes de vues multiples coordonnées, en utilisant le métamodèle en construction. Cet exercice nous a mis en évidence plusieurs limites du métamodèle. D'abord, les types d'association proposés pour relier les éléments de vues ne sont pas assez précis pour décrire et différencier les différents scénarios de constructions de vues 4D. Il a donc été nécessaire de proposer des propriétés permettant de décrire les différents types d'association proposés. Il a également été constaté que les éléments de coordination et les éléments d'interaction n'étaient pas suffisamment différenciés. Le métamodèle a donc dû être raffiné à cet effet.

En utilisant le métamodèle pour décrire les différentes vues multiples 4D, nous nous sommes également rendu compte que certaines vues métiers étaient plus compatibles entre elles que d'autres. Il a donc été prévu un coefficient de compatibilité entre les vues. Par ailleurs, la présentation des classes du métamodèle ne permettait pas d'identifier aisément les classes issues des métamodèles précédents et celles nouvellement introduites. Un code de couleur a donc été choisi pour les différents métamodèles et ce code a été repris dans la représentation des différentes classes du métamodèle de vues multiples coordonnées.

6.2.4.2 Version finale du métamodèle de vues multiples coordonnées

L'intérêt principal de ce métamodèle est de faciliter la description des mécanismes de coordination de vues multiples coordonnées. Il reprend donc les éléments nécessaires provenant des métamodèles de contexte collaboratif et de vue métier et propose des types de relation permettant de les coordonner. Quatre types de relations ont été définis :

- la relation **RepRepAssociation** qui peut être utilisée pour relier deux éléments de représentations visuelles différentes. Un exemple type de ce type de relation est la coordination par la couleur dans laquelle une couleur dans une vue est associée à une couleur dans une autre vue ;
- la relation **ContentContentAssociation** qui permet de relier des éléments de contenu de vues différentes entre eux. Par exemple, des activités de construction dans une vue planning peuvent être associées à des éléments de l'ouvrage dans une vue 3D ;

- la relation **ContentRepAssociation** qui peut être utilisée pour faire une liaison entre un élément de contenu et une représentation visuelle. C'est le cas par exemple lorsque des éléments de structure sont représentés avec une couleur particulière de manière à les établir facilement un lien visuel d'une vue à l'autre ;
- la relation **InteractionCMV** qui peut être utilisée pour associer un principe d'interaction à un ensemble de vues composant le système de vues multiples coordonnées. Un mode d'interaction peut ainsi être configuré pour produire simultanément de l'effet sur l'ensemble de ces vues.

Un degré de compatibilité (pas compatible, peu compatible, compatible) peut être défini pour chacune de ces relations en fonction des concepts et des vues auxquelles elles s'appliquent.

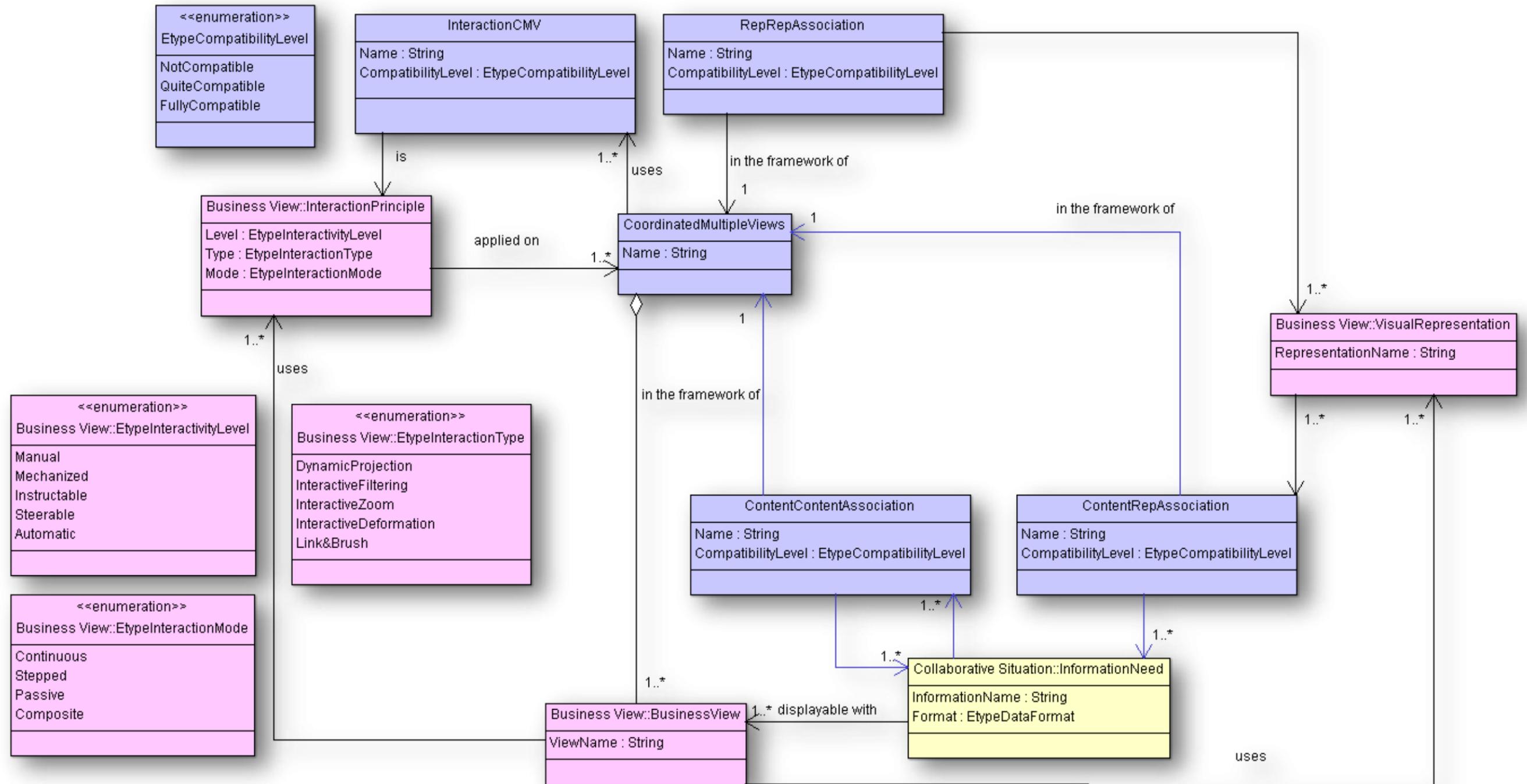


Figure 96 : Métamodèle de vues multiples coordonnées nD

6.2.5 Utilisation de la méthode

6.2.5.1 Comment mettre en correspondance les vues métiers ?

Dans la présentation de la méthode proposée (paragraphe 6.1.2.2), nous avons précisé que l'objectif de la troisième étape est de mettre en correspondance les vues métiers possibles recensées et d'en choisir les plus appropriées aux besoins traités. Il ne s'agit pas d'une tâche aisée dans la mesure où cette comparaison doit tenir compte de critères différents tenant compte du niveau d'adaptation de la technique de représentation utilisée par les vues métiers, le type de contenu affichable, les principes d'interaction supportés, et les tâches de visualisation gérées. Réaliser une telle mise en correspondance pour les différentes vues possibles, en fonction des divers besoins identifiés, peut très vite devenir fastidieux et difficile à gérer.

Nous proposons d'assigner un score unique reflétant le niveau d'adaptation d'une vue métier pour un besoin donné. La formule pour calculer ce score reprend les critères évoqués : caractéristiques de la représentation visuelle, adéquation par rapport au contenu à visualiser, prise en charge des principes d'interaction nécessaires, adéquation par rapport aux tâches de visualisation de l'utilisateur. Le score d'adaptation A_s est donc obtenu en utilisant la formule suivante :

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n Nc_i}{n} \quad \text{avec} \quad Nc_i = \frac{\sum_{j=1}^m P_j}{m}$$

Dans cette formule, Nc_i représente la note obtenue par la technique pour le critère i , en considérant un nombre n de critères. Pour chaque critère i , un nombre m de propriétés sont considérées et une note P_j est attribuée à la représentation visuelle pour chaque propriété j . Le critère relatif aux caractéristiques de la représentation visuelle fait appel aux propriétés telles que la structure, les éléments graphiques, les attributs rétiniens et l'utilisation métier. Les propriétés du critère lié au contenu sont le format des données, la perception mentale et la nature des données. Le niveau d'interaction et le type d'interaction sont les propriétés du critère relatif à la prise en charge des principes d'interaction.

La note Nc_i pour un critère est donc la moyenne des notes obtenues pour chacune de ses propriétés. Et le score d'adaptation A_s correspond à la moyenne des notes obtenues par la représentation visuelle pour les différents critères. Les notes possibles varient de **-1** (la représentation est contre-productive par rapport au critère considéré) à **1** (la représentation est tout à fait adaptée).

Tableau 15 : Critères et propriétés considérés pour le calcul du score d'adaptation A_s

Critères	Propriétés
Technique	Structure
	Éléments graphiques
	Attributs rétinien
	Utilisation métier
Contenu	Format des données
	Perception mentale
	Nature des données
Principes d'interaction	Niveau d'interactivité
	Type d'interaction
Tâches de visualisation	Tâches de visualisation

6.2.5.2 Processus simplifié d'utilisation de la méthode proposée

Pour permettre au lecteur de comprendre l'utilisation de la méthode, nous proposons la figure suivante (Figure 97) dans laquelle nous montrons un processus simplifié d'utilisation. La première colonne présente les étapes de la méthode. Ces étapes sont supportées par différents métamodèles présentés dans la deuxième colonne (niveau M2). La troisième colonne montre le processus simplifié avec les différents éléments repris d'une étape à l'autre de la méthode. La quatrième colonne présente les principaux résultats intermédiaires obtenus dans l'utilisation de la méthode (niveaux M1 et M0).

À la suite de cette figure, nous présentons une autre figure (Figure 98) qui montre le lien entre les différents métamodèles proposés. Plus précisément, on voit les éléments réutilisés lors du passage d'une étape à l'autre. Par exemple, les besoins d'information identifiés lors de la première étape (métamodèle de situation collaborative) sont affichables en utilisant une vue métier décrite dans la troisième étape (métamodèle de vue métier). Les tâches analytiques décrites à la deuxième étape (métamodèle de tâches de visualisation) correspondent au rôle d'un acteur identifié à la première étape (métamodèle de situation collaborative) et sont réalisées sur une vue métier décrite dans la troisième étape (métamodèle de vue métier). Le métamodèle de vues multiples coordonnées (quatrième étape) reprend les éléments tels que le besoin d'information (première étape), les principes d'interaction et la représentation visuelle (troisième étape).

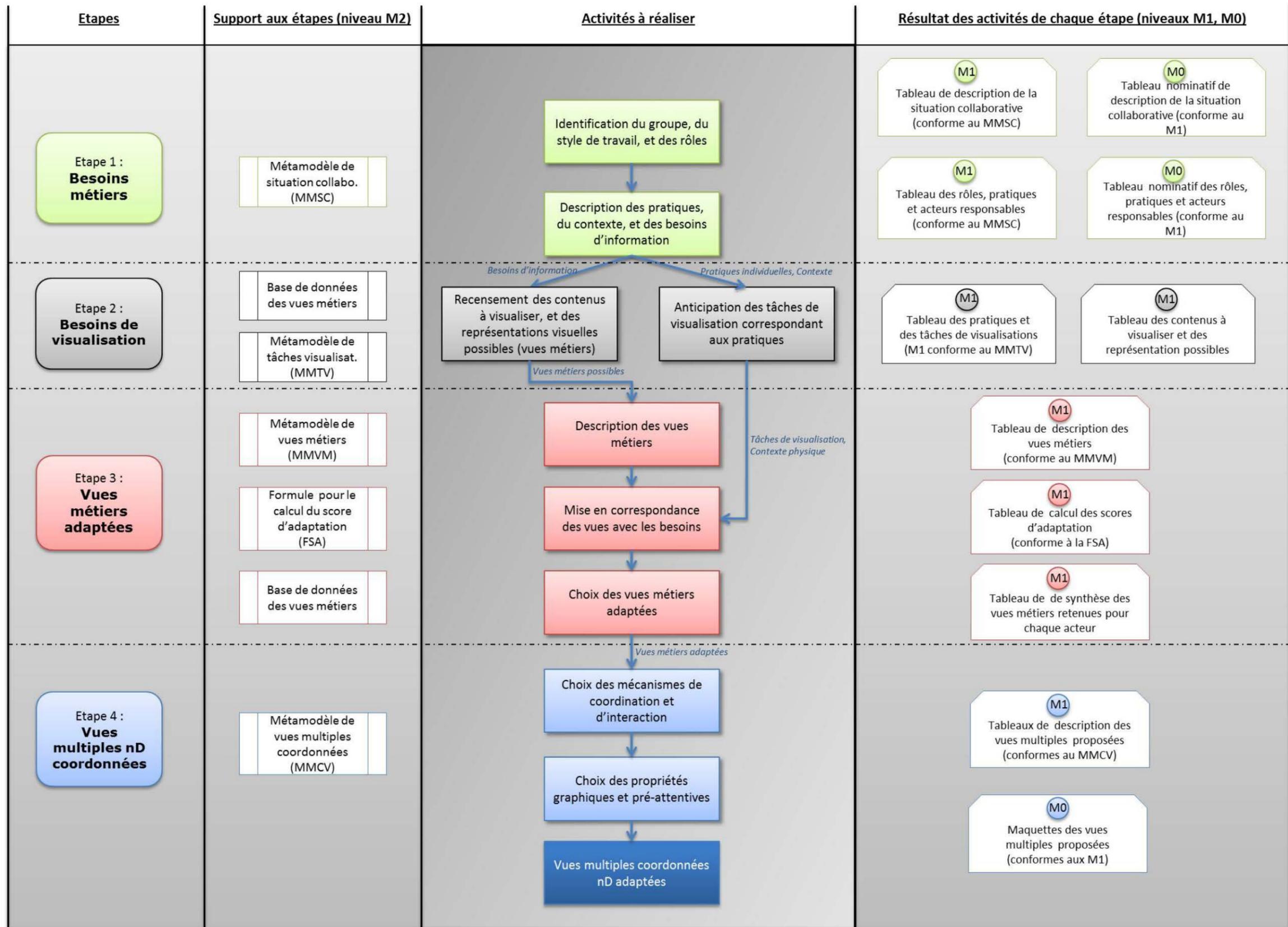


Figure 97 : Positionnement des métamodèles dans la méthode

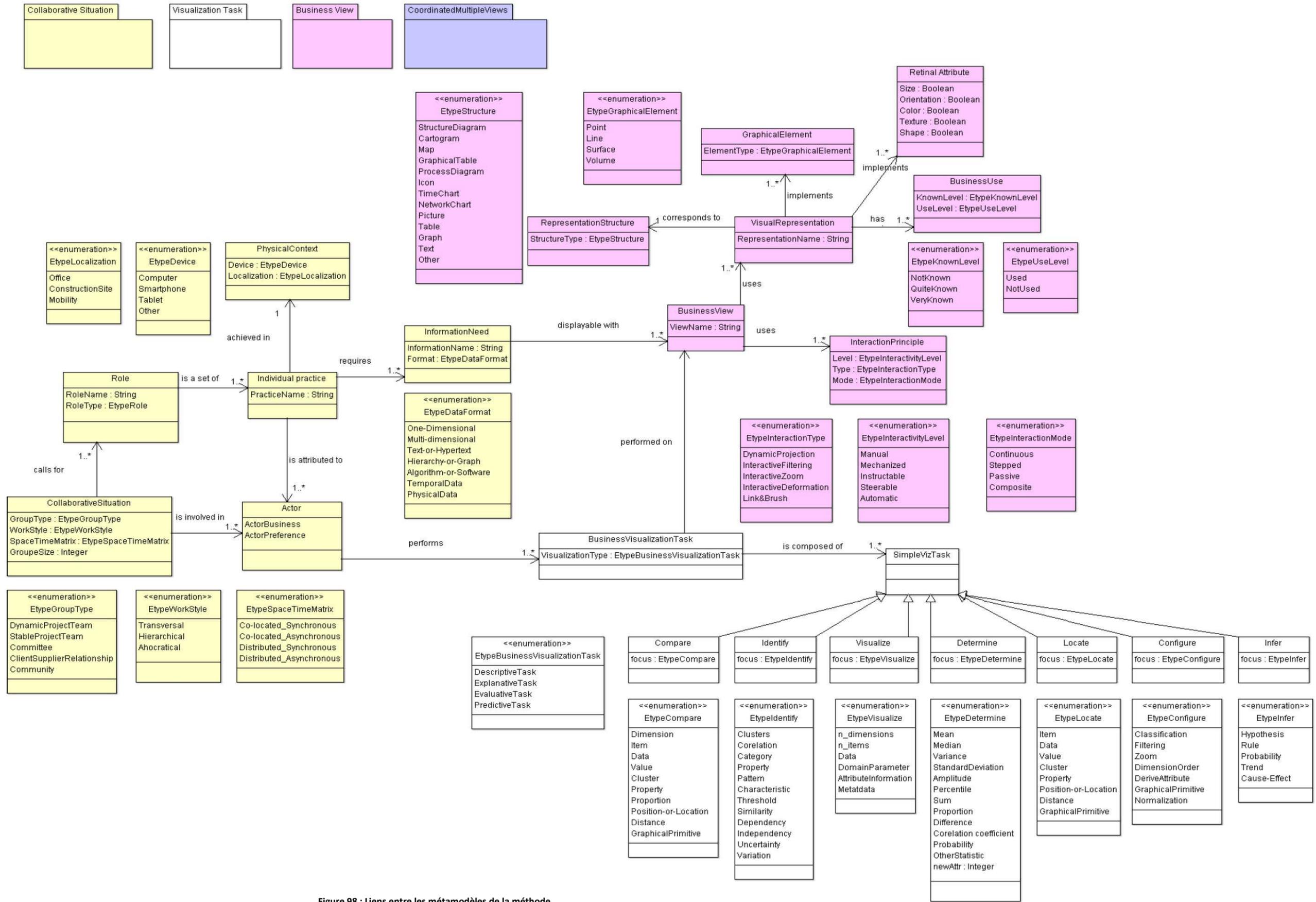


Figure 98 : Liens entre les métamodèles de la méthode

6.3 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode que nous proposons pour la conception de vues multiples nD adaptées aux besoins de chaque acteur impliqué dans une activité de simulation collaborative 4D/nD de la construction. Nous avons pris soin de montrer le positionnement d'une telle méthode par rapport aux travaux antérieurs. Nous avons également mis l'accent sur certains aspects importants de la méthode, sa description globale et les différentes étapes de sa mise en œuvre.

L'approche de modélisation et le formalisme proposés pour l'utilisation de la méthode ont aussi été présentés. Conformément à notre formalisme, des métamodèles ont été conçus pour rendre opérationnelle la méthode. Il s'agit notamment du métamodèle de situation collaborative, du métamodèle de tâches de visualisation, du métamodèle de vue métier et du métamodèle de vues multiples coordonnées. Nous avons présenté les métamodèles en détail et, pour chacun d'entre eux, nous avons rendu compte du processus ayant conduit à sa construction, son évaluation et sa consolidation. Une formule a également été proposée pour permettre la mise en correspondance des vues métiers possibles par rapport à des besoins métiers donnés, de manière à pouvoir en choisir les plus appropriées.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons une application de la méthode à travers l'étude d'un cas réel et une évaluation par des professionnels du secteur des résultats obtenus.

**APPLICATION À LA SIMULATION 4D DE LA CONSTRUCTION ET VALIDATION
DE LA MÉTHODE PROPOSÉE**



*“Observation collects facts; reflection combines them;
experimentation verifies the result of that combination.”*

Denis Diderot

7 Application à la simulation 4D de la construction et validation de la méthode proposée

Dans ce chapitre, nous présentons l'application de la méthode proposée à la simulation collaborative 4D de la construction. Dans un premier temps, nous nous servons d'une étude de cas sur un chantier réel pour dérouler la méthode et proposer des vues adaptées aux besoins des différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D. Il s'agit de confronter la méthode et les modèles proposés à un cas concret, dans une situation réelle de travail sur un chantier, et avec des partenaires professionnels. Contrairement aux expérimentations évoquées dans le chapitre précédent, l'objectif ici n'est pas la construction de la méthode ou des modèles, mais leur évaluation en situation. Dans un deuxième temps, nous soumettons plus largement les vues proposées sur la base de la méthode à l'avis de professionnels du secteur de la construction pour évaluer l'intérêt et la valeur ajoutée qu'elles apportent, mais aussi pour valider la pertinence des besoins identifiés pour chaque acteur.

7.1 Étude de cas sur un chantier réel

7.1.1 Le contexte de l'étude de cas

Pour permettre une bonne compréhension de l'étude de cas, il est important d'en présenter le contexte et les modalités. Nous présentons ici le contexte et le déroulement de l'étude.

7.1.1.1 Le contexte

L'étude de cas porte sur un détail technique en phase d'exécution d'un chantier de lotissement au Luxembourg. Il s'agit d'un projet de construction d'un ensemble de 13 maisons unifamiliales à basse énergie. Les blocs de maisons présentent un dénivelé les unes par rapport aux autres et sont séparés par des joints (voir Figure 99). Cette complexité de conception rend assez difficile la réalisation des

isolations et de la couverture ainsi que l'étanchéité au droit des joints. La difficulté est d'autant plus importante que :

- la réalisation fait intervenir l'expérience de plusieurs corps de métier différents à savoir la maçonnerie, la toiture, l'isolation et l'étanchéité ; et
- les mêmes entreprises n'étant pas mandataires de la réalisation de tous les blocs d'habitations, les solutions mises en œuvre par une équipe ne sont donc pas utilisables par l'équipe d'un autre lot. Elles sont en effet le fruit d'un ajustement mutuel sur le chantier et sont donc peu documentées.

Suite à un premier contact avec les superviseurs de ce chantier, nous avons proposé la simulation 4D, argumentant qu'elle peut être envisagée pour :

- permettre de simuler la mise en œuvre de cette partie du chantier afin d'en avoir une compréhension visuelle dans l'espace ;
- permettre aux superviseurs du chantier d'explorer plusieurs scénarios de séquençage des différents corps de métier et de choisir l'ordonnancement le plus optimal pour une bonne réalisation ;
- fournir aux différents sous-traitants, chacun en ce qui le concerne, des documents d'exécution visuels pour les guider, dans le temps et dans l'espace, dans la mise en œuvre de leur part d'ouvrage.



Figure 99 : Aperçu d'un des blocs de maisons projetés

Ce cadre applicatif nous permet surtout d'envisager la spécification de vues multiples 4D, dans un cas concret, avec la possibilité d'évaluer la démarche de conception et les résultats, c'est-à-dire les vues obtenues, avec les acteurs du terrain.

7.1.1.2 Déroulement de l'étude et modalités

L'étude de cas a été réalisée en collaboration avec des superviseurs. Ces derniers fournissent les éléments permettant une compréhension des besoins, y compris le problème à simuler et toute autre information permettant de le décrire. Ceci inclut notamment les pièces graphiques et les plannings existants, sur supports numériques et papier. Sur cette base, nous avons réalisé la

simulation 4D en utilisant une licence du plug-in *4D Virtual Builder* fournie par la société D-Studio pour la durée de l'expérimentation.

Une série de six réunions a permis de valider les différentes étapes de la simulation. Elles ont lieu sur le chantier de construction. L'objectif de ces réunions est de valider la modélisation 3D, de travailler sur les scénarios du modèle 4D, d'identifier et de comprendre les besoins de chaque entreprise, de définir ensemble des modes et attributs de visualisation à mettre en œuvre, de valider la simulation, fournir des feedbacks et valider les différentes synthèses. La Figure 100 montre les principales étapes préliminaires qui étaient nécessaires au bon déroulement de l'étude.

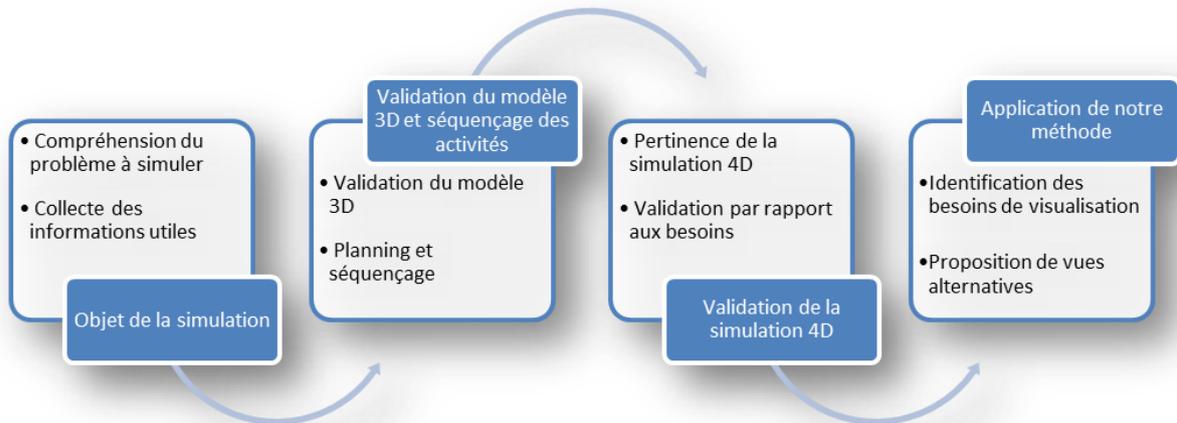


Figure 100: Principales étapes préliminaires nécessaires pour l'étude de cas

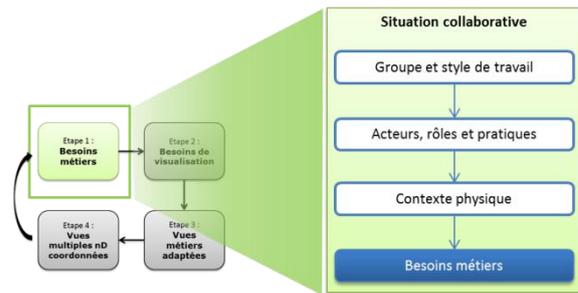
7.1.2 Application de la méthode proposée

Il s'agit notamment ici d'instancier les métamodèles proposés de manière à appliquer la méthode entière à la situation collaborative étudiée. Conformément à notre formalisme de modélisation décrit dans le chapitre précédent, les modèles du niveau M1, instances des métamodèles proposés (M2), sont représentés par des tableaux. Le niveau M0 correspondant au monde réel est représenté par des noms de personnes réelles, des maquettes de vues, etc. Dans la présentation des résultats ici, nous nous contenterons de présenter, dans les trois premières étapes de la méthode, les modèles (tableaux) du niveau M1. Nous ne présenterons pas le niveau M0 correspondant au monde réel (noms réels, etc.) pour des raisons de confidentialité vis-à-vis des personnes ayant participé à l'étude, et parce qu'ils ne sont pas indispensables pour comprendre les résultats présentés. Par contre, à la quatrième étape de la méthode (relative conception des vues multiples adaptées), nous présenterons les modèles du niveau M1 et les maquettes (M0) des vues correspondant à ces modèles.

7.1.2.1 Description de la situation collaborative

La première étape de la méthode proposée consiste à caractériser la situation collaborative. Il s'agit notamment de comprendre le groupe et le style de travail, d'identifier les acteurs, leurs rôles et leurs pratiques et leurs besoins d'information.

Plusieurs acteurs sont impliqués dans l'étude de cas. À la lumière de notre théorie sur la simulation collaborative, nous distinguons les *doers*, les *done for*, les *done with*, les *done to* et les *done without*. Dans le cadre de l'étude, nous jouons le rôle de *doer* dans la mesure où nous réalisons nous-mêmes le modèle 4D. À cet effet, nous nous appuyons sur l'expérience de deux superviseurs chargés de la coordination du chantier et qui vont nous guider tout au long du processus de modélisation 4D et nous fournir les informations utiles. Ces superviseurs sont les *done to*. Mais le modèle ne va pas servir uniquement aux superviseurs, mais également à d'autres acteurs impliqués dans la construction et qui seront les *done for* sont les suivants :



- Entreprises de maçonnerie : plusieurs entreprises de maçonnerie sont impliquées et chacune est responsable d'un bloc de maison.
- Entreprise d'isolation : une seule entreprise d'isolation est responsable pour tous les blocs de maison.
- Entreprise d'étanchéité : une seule entreprise d'étanchéité est responsable pour tous les blocs de maison.
- Entreprises de charpente : plusieurs entreprises de charpente sont impliquées et chacune est responsable d'un bloc de maison.
- Entreprises de couverture : plusieurs entreprises de couverture sont impliquées et chacune est responsable d'un bloc de maison.
- Superviseurs de chantier : Deux superviseurs sont responsables de la planification du chantier, du suivi et de la coordination de l'ensemble des travaux.

En dehors de ces acteurs, la simulation a par ailleurs reçu le soutien d'un *done with* en la personne (morale) de la société D-Studio qui nous a fourni l'outil logiciel nécessaire. Les résultats de l'expérimentation peuvent être exploités comme outil d'aide à la décision en interne par les responsables de l'entreprise générale et les éléments scientifiques pourront être utilisés par le CRP Henri Tudor et le laboratoire MAP CRAI. Ces acteurs sont des *done without*.

Tableau 16 : Acteurs impliqués dans la simulation

Doer	Done to	Done for	Done with	Done without
Chercheur (Nous)	Superviseurs	<ul style="list-style-type: none"> • Entreprises de maçonnerie • Entreprise d'isolation • Entreprise d'étanchéité • Entreprises de charpente • Entreprises de couverture • Superviseurs 	Société D-Studio	<ul style="list-style-type: none"> • Responsables de l'entreprise générale • CRP Henri Tudor • MAP CRAI

Dans la suite, nous allons nous focaliser sur les *done to* et les *done for* qui constituent les acteurs professionnels dont les besoins peuvent nous aider à valider les résultats de l'application de la

méthode. Le tableau ci-dessous (niveau M1), réalisé à partir du métamodèle de situation collaborative (niveau M2), repositionne ces acteurs dans la situation collaborative et décrit le type de groupe, l'objectif, le style de travail ainsi que la matrice spatio-temporelle.

Tableau 17 : Description de la situation collaborative

Type de groupe	Equipe de projet dynamique
Objectif du groupe	Collaborer pour exécuter le détail technique dans les meilleures conditions sur toutes les maisons
Style de travail	Adhocratique
Rôles	<ul style="list-style-type: none"> - Planification - Réalisation de la maçonnerie - Réalisation de la charpente - Réalisation de l'isolation - Réalisation de la couverture - Supervision/Coordination
Acteurs impliqués	<ul style="list-style-type: none"> - Superviseurs - Sous-traitant en maçonnerie - Sous-traitant en charpenterie - Sous-traitant en isolation - Sous-traitant en couverture
Matrice spatio-temporelle	<ul style="list-style-type: none"> - Asynchrone - Même lieu / Différents lieux

Les rôles identifiés mettent en œuvre des pratiques individuelles de la part des acteurs responsables. Le tableau suivant présente ces rôles, les pratiques individuelles qu'ils génèrent ainsi que les acteurs qui en sont responsables.

Tableau 18 : Pratiques individuelles liées aux différents rôles et acteurs responsables

Rôles	Pratiques individuelles	Acteurs responsables
Planification	<ul style="list-style-type: none"> - Planifier toutes les activités de construction - Identifier et gérer les conflits et les chevauchements 	Superviseurs
Réalisation de la maçonnerie	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la planification des activités de maçonnerie - Réaliser les activités de maçonnerie pour une maison - Envoyer des feedbacks 	Sous-traitants en maçonnerie
Réalisation de la charpente	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la planification des activités de charpenterie - Réaliser les activités de charpenterie pour une maison - Envoyer des feedbacks 	Sous-traitants en charpenterie
Réalisation de l'isolation	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la planification des activités d'isolation - Réaliser les activités d'isolation pour toutes les maisons - Envoyer des feedbacks 	Sous-traitant en isolation
Réalisation de la couverture	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la planification des activités de couverture - Réaliser les activités de couverture pour une maison - Envoyer des feedbacks 	Sous-traitants en charpenterie
Supervision / Coordination	<ul style="list-style-type: none"> - Envoyer le planning - Consulter les feedbacks et réviser le planning - Envoyer des notifications 	Superviseurs

Chaque pratique individuelle a lieu dans un contexte donné et fait appel à des besoins d'information précis et la connaissance du contexte physique dans lequel les pratiques seront réalisées est également utile (voir tableau suivant).

Tableau 19 : Besoins d'information et contextes physiques

Acteurs	Pratiques individuelles	Besoins d'information	Contextes physiques
Superviseur	Planifier toutes les activités	- Toutes les activités - Dates d'exécution - Chemin critique	Au bureau, sur ordinateur
	Gérer les conflits et les chevauchements	- Représentation de l'ouvrage	Au bureau, sur ordinateur
	Envoyer le planning	- Adresses des sous-traitants	Au bureau, sur ordinateur
	Consulter les feedbacks	- Feedbacks	Au bureau, sur ordinateur
	Envoyer des notifications	- Notifications - Adresses des sous-traitants	Au bureau, sur ordinateur
Sous-traitants en maçonnerie	Vérifier la planification des activités de maçonnerie	- Planning des activités de maçonnerie	Au bureau, sur ordinateur
	Réalisation des activités de maçonnerie sur une maison	- Activités de maçonnerie sur une maison - Représentation de l'ouvrage à réaliser	Sur chantier, avec un terminal mobile
	Envoi de feedback	- Formulaire de feedback - Adresse du superviseur	Sur chantier, avec un terminal mobile
Sous-traitant en isolation	Vérifier la planification des activités d'isolation	- Planning des activités d'isolation	Au bureau, sur ordinateur
	Réalisation des activités d'isolation sur toutes les maisons	- Activités de maçonnerie sur toutes les maisons - Représentation de l'ouvrage à réaliser	Sur chantier, avec un terminal mobile
	Envoi de feedback	- Formulaire de feedback - Adresse du superviseur	Sur chantier, avec un terminal mobile
Sous-traitants en charpenterie	Vérifier la planification des activités de charpenterie	- Planning des activités de charpenterie	Au bureau, sur ordinateur
	Réalisation des activités de charpenterie sur une maison	- Activités de charpenterie sur une maison - Représentation de l'ouvrage à réaliser	Sur chantier, avec un terminal mobile
	Envoi de feedback	- Formulaire de feedback - Adresse du superviseur	Sur chantier, avec un terminal mobile
Sous-traitants en couverture	Vérifier la planification des activités de couverture	- Planning des activités de couverture	Au bureau, sur ordinateur
	Réalisation des activités de couverture sur une maison	- Activités de couverture sur une maison - Représentation de l'ouvrage à réaliser	Sur chantier, avec un terminal mobile
	Envoi de feedback	- Formulaire de feedback - Adresse du superviseur	Sur chantier, avec un terminal mobile

L'ensemble de ces différents éléments constitue les besoins métiers pour les différents acteurs identifiés, dont certains seront réutilisés à l'étape suivante.

7.1.2.2 Les besoins de visualisation

À cette étape, les besoins d'information des différents acteurs seront considérés comme étant les contenus à visualiser. Pour l'affichage de chaque besoin d'information, plusieurs représentations visuelles sont possibles. Nous identifions ici les plus courantes afin de les comparer plus tard.

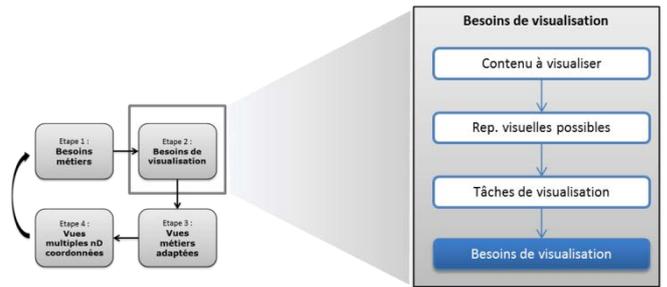


Tableau 20 : Représentations visuelles possibles des besoins d'information

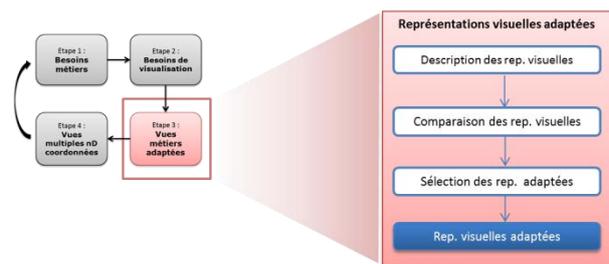
Besoins d'information	Représentations visuelles possibles
Toutes les activités Dates d'exécution	Tableau Calendrier Diagramme de Gantt Réseau PERT Planification linéaire
Représentation de l'ouvrage à réaliser	Représentation 2D 3D monochrome 3D texturé
Adresses des sous-traitants	Tableau Liste
Feedbacks/Notification	Liste Formulaire
Planning des activités de maçonnerie	Tableau Calendrier Diagramme_Gantt Réseau PERT Planification linéaire
Représentation des éléments de maçonnerie à réaliser	Représentation 2D 3D monochrome 3D texturé
Planning des activités d'isolation	Tableau Calendrier Diagramme Gantt Réseau PERT Planification linéaire
Représentation des éléments d'isolation à réaliser	Représentation 2D 3D monochrome 3D texturé
Planning des activités de charpenterie	Tableau Calendrier Diagramme_Gantt Réseau PERT Planification linéaire
Représentation des éléments de charpente à réaliser	Représentation 2D 3D monochrome 3D texturé
Planning des activités de couverture	Tableau Calendrier Diagramme Gantt Réseau PERT Planification linéaire
Représentation des éléments de couverture à réaliser	{Représentation 2D 3D monochrome 3D texturé

À cette étape, il est également question de décrire les tâches de visualisation des acteurs, en utilisant le métamodèle de tâches de visualisation. Pour illustrer le travail fait à cet effet, nous prenons l'exemple du besoin du superviseur relatif à l'identification des conflits et des chevauchements. Pour identifier les besoins, le superviseur doit réaliser les tâches décrites dans le tableau ci-dessous.

Tâche de visualisation	Focus de la tâche	Observations
Visualiser	Données	Visualiser le séquençage des activités et les éléments de l'ouvrage
Localiser	Positions	localiser les positions des éléments de l'ouvrage
Identifier	Dépendances	identifier les dépendances entre les activités et les éléments
Déduire	Tendances	déduire s'il y a des conflits ou des chevauchements

7.1.2.3 Le choix des vues métiers adaptées

Une fois que les vues possibles ont été identifiées, nous les mettons en correspondance avec les besoins, de manière à pouvoir en sélectionner les plus appropriées. Pour permettre une telle mise en correspondance, nous disposons d'une base de données, continuellement alimentée, d'une centaine de vues métiers, décrits suivant le métamodèle de vues métiers.



Le tableau suivant présente une description, suivant le métamodèle de vues métiers, des principales vues que nous mettons en correspondance dans la suite. Il faut préciser que dans le cadre de notre étude de cas, nous nous sommes limités à la simulation 4D, c'est-à-dire la représentation de l'ouvrage et le planning des activités uniquement. Nous faisons ainsi abstraction des autres vues métier qui, nous le précisons, sont loin d'être inutiles.

Tableau 21 : Description des vues métiers

Vues métiers Description	Représentation 2D	3D monochrome	3D texturé	Diagramme de Gantt	Réseau PERT	Planification linéaire
Structure	Carte	Autre	Autre	Diagramme	Diagramme	Diagramme
Éléments graphiques	Lignes Surfaces	Volumes	Volume	Lignes	Lignes	Lignes, Surfaces
Attributs rétinéens	Taille Forme Valeur Orientation	Size, Shape, Color, Value, Orientation	Size, Texture, shape, color, Orientation	Size, color, Value	Color	Color, Size
Niveau de connaissance	Très connue	Très connue	Très connue	Très connu	Assez connu	Peu connue
Niveau d'utilisation	Très utilisée	Assez utilisée	Assez utilisée	Très utilisé	Assez utilisé	Peu utilisé
Format des données	Données physiques	Données physiques	Données physiques	Données temporelles	Données temporelles	Données temporelles
Spatialité	Non spatiale	Spatiale	Spatiale	Non spatial	Non spatial	Spatiale
Temporalité	Non temporelle	Non temporelle	Non temporelle	Temporel	Temporel	Temporelle
Concret-Abstrait	Abstraite	Concrète	Concrète	Abstrait	Abstrait	Abstrait

Le travail suivant consiste à comparer les représentations visuelles possibles en vue d'en choisir les plus appropriées pour un besoin donné. Pour cela, nous utilisons la formule proposée pour attribuer un score d'adaptation (A_s) à chaque représentation visuelle. Rappelons que le score d'adaptation A_s correspond à la moyenne des notes N_{c_i} obtenues par la représentation visuelle pour les différents critères. La note N_{c_i} pour un critère est la moyenne des notes obtenues pour chacune de ses propriétés. Ce score varie en -1 et 1 et plus il est proche de 1, plus la technique est appropriée au besoin traité, et inversement.

Il est à préciser que dans le cas de l'étude de cas, nous avons attribué ces scores sur la base de l'état de l'art réalisé à propos de la planification de la construction et de notre connaissance du secteur de la construction, basée sur notre expérience personnelle. Ceci constitue une limite du travail de thèse dans la mesure où il eût fallu procéder à une enquête auprès de professionnels afin de valider ces notes attribuées.

Tableau 22 : Calcul du score As pour différentes représentations visuelles de l'ouvrage, par rapport au besoin d'identification des conflits du superviseur

Critères	Propriétés	2D	3D mono.	3D texturé
Technique	Structure	-1	1	1
	Éléments graphiques	-1	0	1
	Attributs rétinien	0	1	1
	Utilisation métier	1	0	-1
	Nc₁	-0,33	0,5	0,5
Contenu	Format des données	0	1	1
	Perception mentale	-1	0	1
	Nature des données	-1	1	1
	Nc₂	-0,66	0,66	1
Principes d'interaction	Niveau d'interaction	0	0	0
	Type d'interaction	0	1	1
	Nc₃	0	0,5	0,5
Tâches de visualisation	Tâches de visualisation	-1	0	1
	Nc₄	-1	0	1
	As	-0,50	0,41	0,75

Tableau 23 : Calcul du score As pour différentes représentations visuelles de l'ouvrage, par rapport au besoin de vérification des activités répétitives d'isolation

Critères	Propriétés	Diagramme de Gantt	Réseau PERT	Planification linéaire
Technique	Structure	0	0	1
	Éléments graphiques	0	0	1
	Attributs rétinien	1	0	1
	Utilisation métier	1	0	0
	Nc₁	0,5	0	0,75
Contenu	Format des données	0	0	1
	Perception mentale	0	0	1
	Nature des données	0	0	1
	Nc₂	0	0	0,75
Principes d'interaction	Niveau d'interaction	0	0	0
	Type d'interaction	0	0	0
	Nc₃	0	0	0
Tâches de visualisation	Tâches de visualisation	-1	-1	1
	Nc₄	-1	-1	1
	As	-0,125	-0,25	0,625

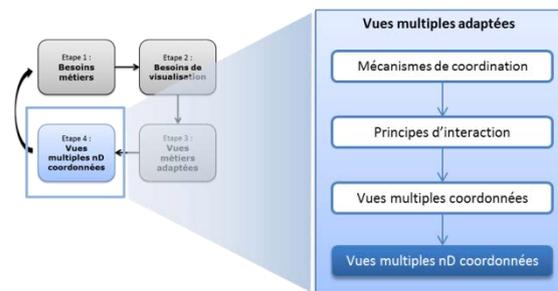
Ces opérations sont réalisées pour chaque besoin des différents acteurs impliqués. À la fin de l'étape, les vues métiers les plus appropriées sont sélectionnées pour chacun des besoins. Nous obtenons le tableau de synthèse suivant.

Tableau 24 : Synthèse des vues métiers sélectionnées pour chaque acteur

Acteurs	Vues métiers choisies
Superviseur	Réseau PERT
	3D texturé
Sous-traitant en maçonnerie	Diagramme de Gantt
	3D texturé
Sous-traitant en isolation	Planification linéaire
	3D texturé
Sous-traitant en charpenterie	Diagramme de Gantt
	3D texturé
Sous-traitant en couverture	Diagramme de Gantt
	3D texturé

7.1.2.4 La composition de vues multiples 4D adaptées

Les vues métiers ont été sélectionnées à l'étape précédente. Il s'agit maintenant de les coordonner et de leur associer des principes d'interaction adéquats, de manière à proposer des vues multiples coordonnées adaptées aux différents acteurs. Nous utilisons alors le métamodèle de vues multiples coordonnées pour décrire des instances de CMV correspondant aux besoins de chacun. Selon notre formalisme, nous utiliserons des tableaux (augmentés) au niveau M1 et des maquettes des vues proposées au niveau M0.

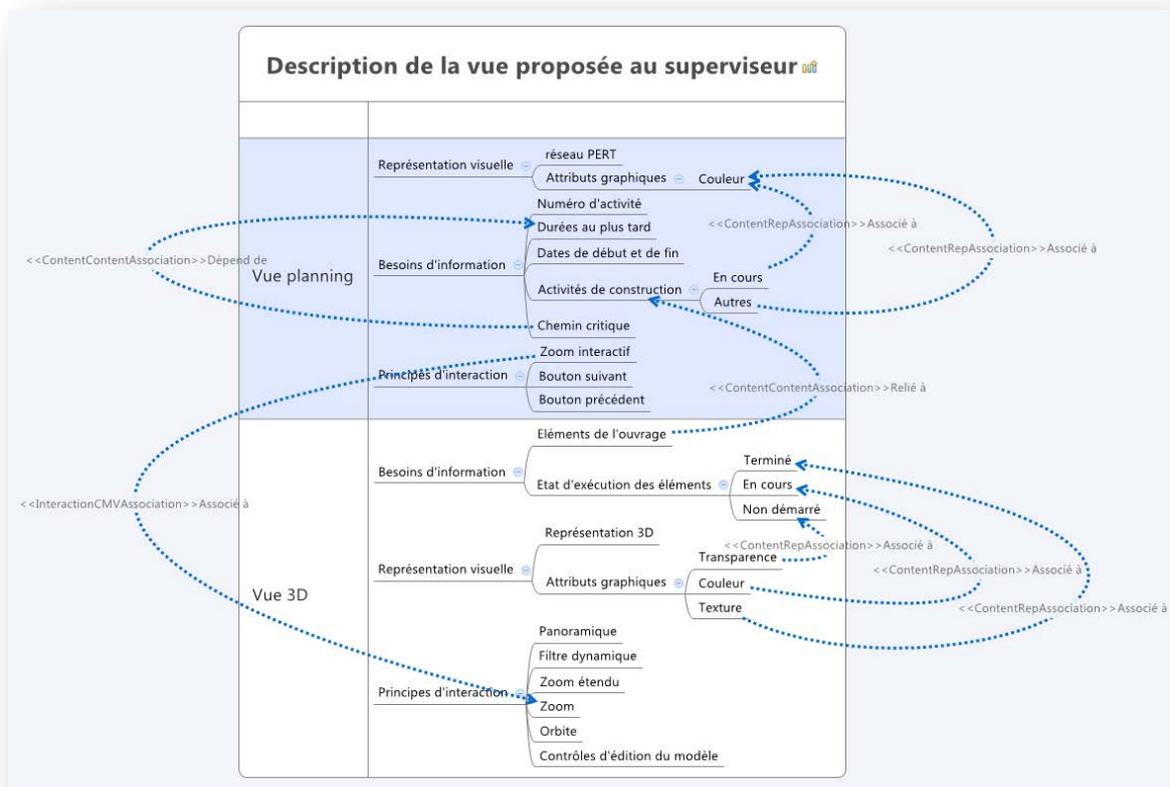


Nous présentons ci-après les vues proposées à trois de ces acteurs (superviseur, sous-traitant de charpente, sous-traitant d'isolation), avec les principaux éléments de description pour leur composition.

La vue multiple proposée au superviseur se base sur les deux vues métiers à lui sélectionnées à l'étape précédente, c'est-à-dire un réseau PERT et une représentation 3D texturée de l'ouvrage. Dans le réseau PERT, nous convenons d'utiliser la couleur comme attribut graphique permettant de différencier les activités en cours de réalisation des autres. Une association « Associé à », qui est une *ContentRepAssociation*, lie donc la couleur aux activités. Le chemin critique, information cruciale pour le superviseur, dépend des durées au plus tard. Les activités de constructions affichées dans le

réseau PERT sont reliées aux éléments de l'ouvrage correspondants affichés dans la vue 3D, par l'intermédiaire d'une relation « relié à » qui est une *ContentContentAssociation*. Dans la vue 3D, deux principaux attributs graphiques sont utilisés : la couleur et la texture. Nous ajoutons à ces attributs la transparence qui permet de rendre invisibles les éléments dont la construction n'a pas encore démarré via une relation « associé à », qui est une *ContentRepAssociation*. En dehors de ces éléments, il y a aussi les éléments en cours de réalisation et les éléments déjà exécutés. Une couleur sera affectée aux éléments en cours de réalisation et la texture sera associée aux éléments exécutés (relation « associé à »). Un certain nombre de principes d'interaction seront associés à chacune des deux vues (Zoom interactif, Bouton suivant, Bouton précédent pour le réseau PERT ; Panoramique, Filtre dynamique, Zoom étendu, Zoom, Orbite, etc. pour la vue 3D). Une relation de type *InteractionCMVAssociation* est prévue pour synchroniser le zoom interactif de la vue PERT et le Zoom de la vue 3D, de manière à harmoniser quelque peu le niveau de détails.

Tableau 25 : Description de la vue proposée au superviseur (niveau M1)



La figure suivante montre une maquette de la multi-vue 4D correspondant à cette description. Cette multi-vue associe le modèle 3D de l'ouvrage à un réseau PERT. Dans les deux vues associées, une même couleur verte (attribut rétinien préattentif) est utilisée pour représenter l'ouvrage en cours de réalisation (vue 3D) et la tâche associée dans le planning (réseau PERT). Le superviseur ayant besoin d'avoir une vue globale sur tout le chantier, les deux vues sont coordonnées de manière à ce qu'il puisse naviguer à travers les tâches (boutons « suivant » et « précédent ») tout en visualisant l'élément d'ouvrage correspondant, ou d'utiliser le zoom pour changer le niveau de granularité et passer d'une tâche à un ensemble de tâches.

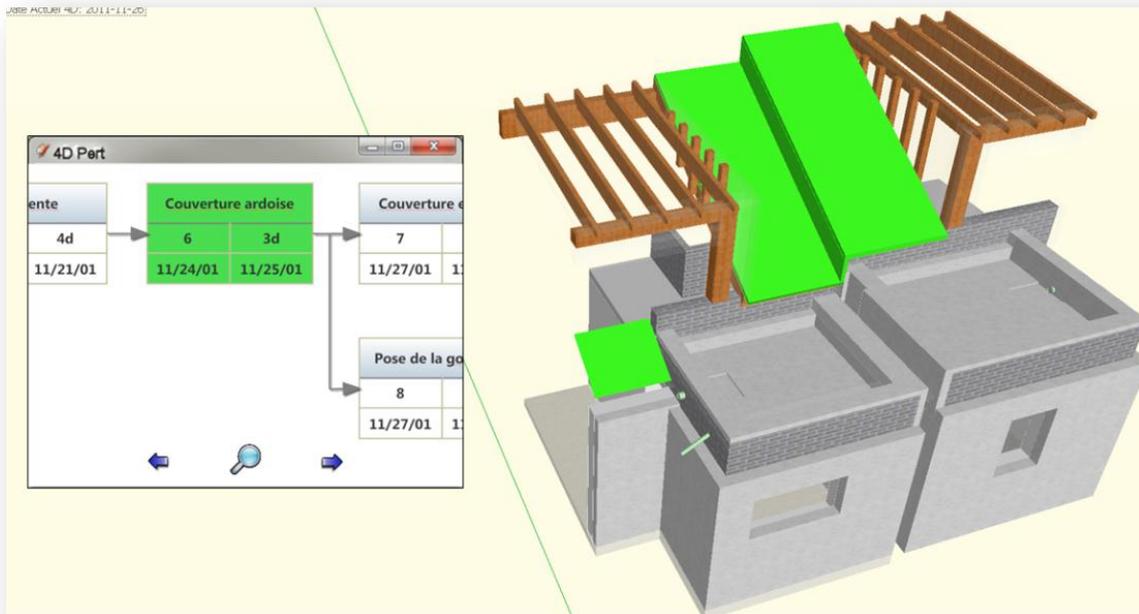
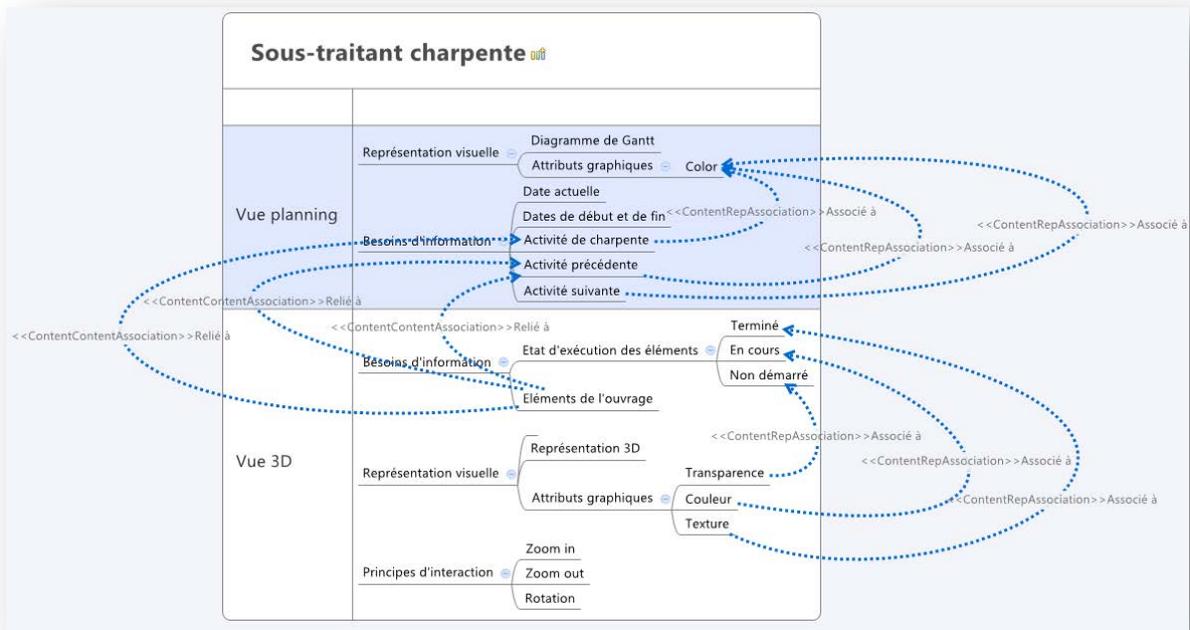


Figure 101 : Maquette de la vue proposée au superviseur (niveau M0)

La vue multiple proposée au sous-traitant en charpente se base sur les deux vues métiers à lui sélectionnées à l'étape précédente, c'est-à-dire un diagramme de Gantt et une représentation 3D texturée de l'ouvrage. Dans le diagramme de Gantt, nous convenons d'utiliser la couleur comme attribut graphique permettant de différencier les activités en cours de réalisation des activités précédentes et suivantes. Une association « Associé à », qui est une *ContentRepAssociation*, lie donc une couleur à chacun de ces types d'activité. Les activités de constructions affichées dans le diagramme de Gantt sont reliées aux éléments de l'ouvrage correspondants affichés dans la vue 3D, par l'intermédiaire d'une relation « relié à » qui est une *ContentContentAssociation*. Dans la vue 3D, deux principaux attributs graphiques sont utilisés : la couleur et la texture. Comme dans la multi-vue proposée au superviseur, la transparence permet de rendre invisibles les éléments dont la construction n'a pas encore démarré via une relation « associé à », qui est une *ContentRepAssociation*. Les éléments en cours de réalisation seront associés à une couleur, les éléments dont la réalisation précède immédiatement l'élément en cours seront représentés dans une couleur différente et les éléments à réaliser juste après seront représentés dans une autre couleur (relation « associé à » de type *ContentRepAssociation*). Une texture sera associée aux autres éléments.

Tableau 26 : Description de la vue proposée au sous-traitant en charpente



La figure suivante montre une copie d'écran de la vue correspondant à cette description. Cette vue associe un diagramme de Gantt à un modèle 3D de l'ouvrage. Mais si cette multi-vue semble a priori classique, il n'en est rien. Elle est originale et a été conçue pour répondre aux besoins précis du sous-traitant en charpente. En effet, parmi les besoins identifiés, il a besoin de comprendre la tâche qu'il doit réaliser, mais aussi de connaître les tâches qui se déroulent avant et après lui. Ainsi, un système de couleur a été défini pour représenter ces besoins d'information, aussi bien dans la vue planning que dans la vue 3D. La couleur verte représente les éléments (tâches et éléments d'ouvrages) en cours (réalisés par le sous-traitant en charpente). La couleur rouge représente les éléments réalisés avant lui et la couleur bleue représente les éléments réalisés juste après lui.

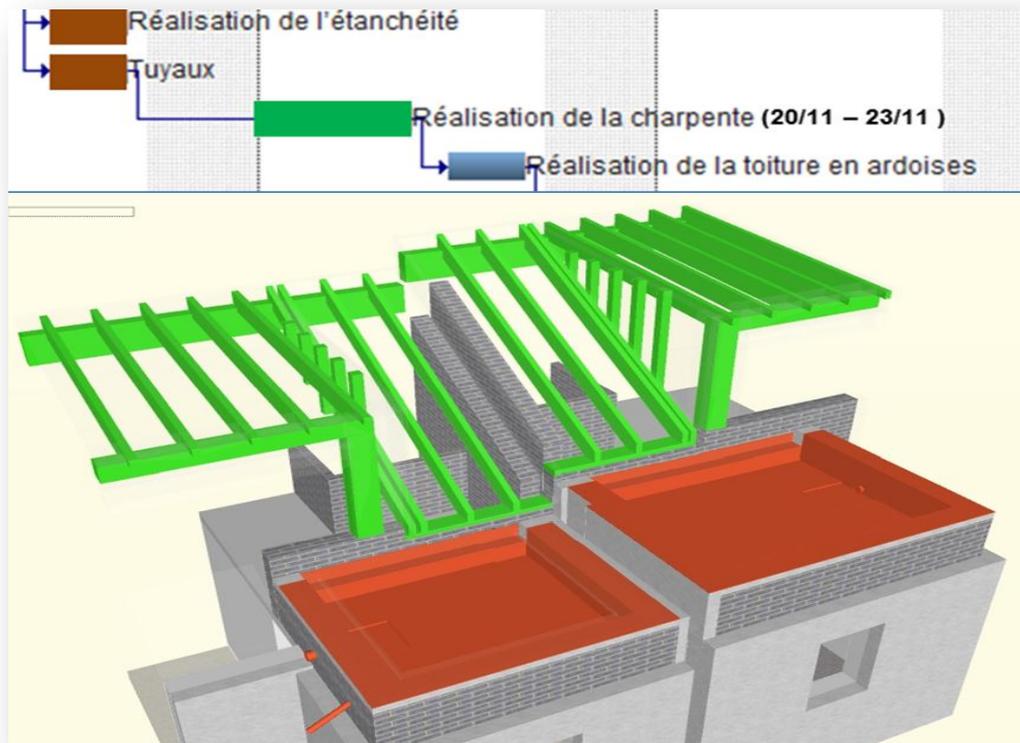
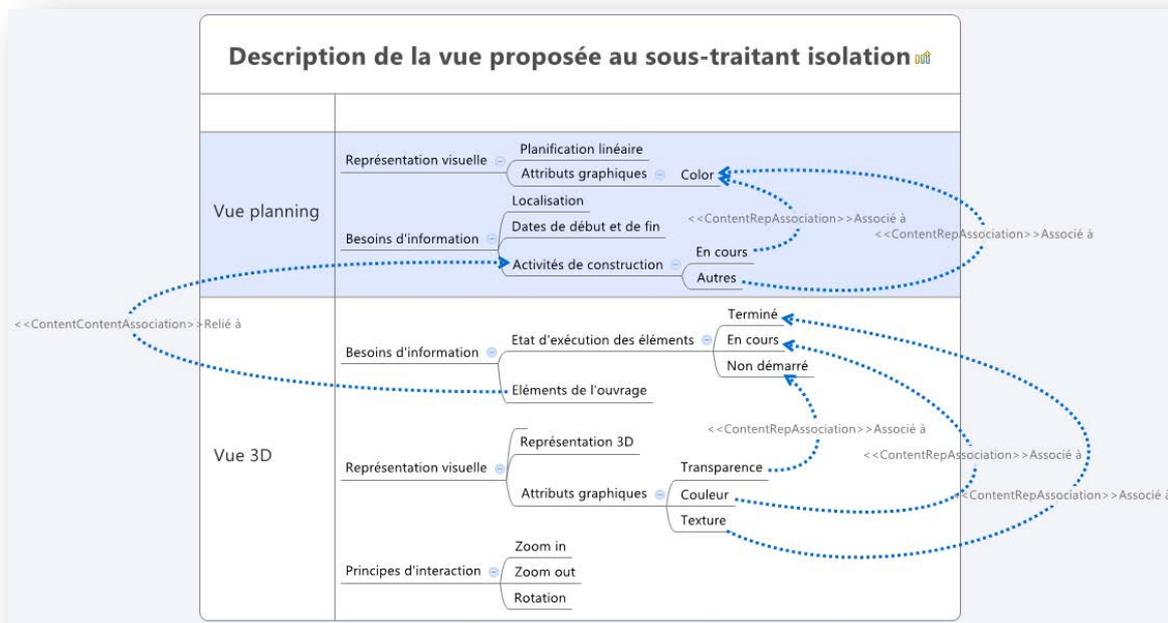


Figure 102 : Maquette de la vue proposée au sous-traitant en charpente

La vue multiple proposée au sous-traitant en isolation se base sur les deux vues métiers à lui sélectionnées à l'étape précédente, c'est-à-dire une planification linéaire et une représentation 3D texturée de l'ouvrage. La planification affiche toutes les maisons sur lesquelles il doit intervenir avec la localisation de son intervention. Nous convenons d'utiliser la couleur comme attribut graphique permettant de différencier les activités en cours de réalisation des autres. Une association « Associé à », qui est une *ContentRepAssociation*, lie donc une couleur à chacun de ces types d'activité. Les activités de constructions affichées dans la planification linéaire sont reliées aux éléments de l'ouvrage correspondants affichés dans la vue 3D, par l'intermédiaire d'une relation « relié à » qui est une *ContentContentAssociation*. Dans la vue 3D, deux principaux attributs graphiques sont utilisés : la couleur et la texture. Comme dans les autres multi-vues, la transparence permet de rendre invisibles les éléments dont la construction n'a pas encore démarré via une relation « associé à », qui est une *ContentRepAssociation*. Les éléments en cours de réalisation seront associés à une couleur et une texture sera associée aux autres éléments.

Tableau 27 : Description de la vue proposée au sous-traitant en isolation



La figure suivante montre une copie d'écran de la vue correspondant à cette description. Cette multi-vue 4D correspond notamment au besoin du sous-traitant en maçonnerie d'organiser des équipes parallèles pouvant travailler simultanément à des emplacements différents. La planification linéaire est donc le mode de représentation du planning le plus approprié pour permettre une visualisation spatio-temporelle des tâches répétitives à réaliser par ce sous-traitant. La couleur verte est utilisée comme attribut rétinien préattentif pour identifier les éléments à réaliser dans les deux vues entrant dans le cadre de cette multi-vue.

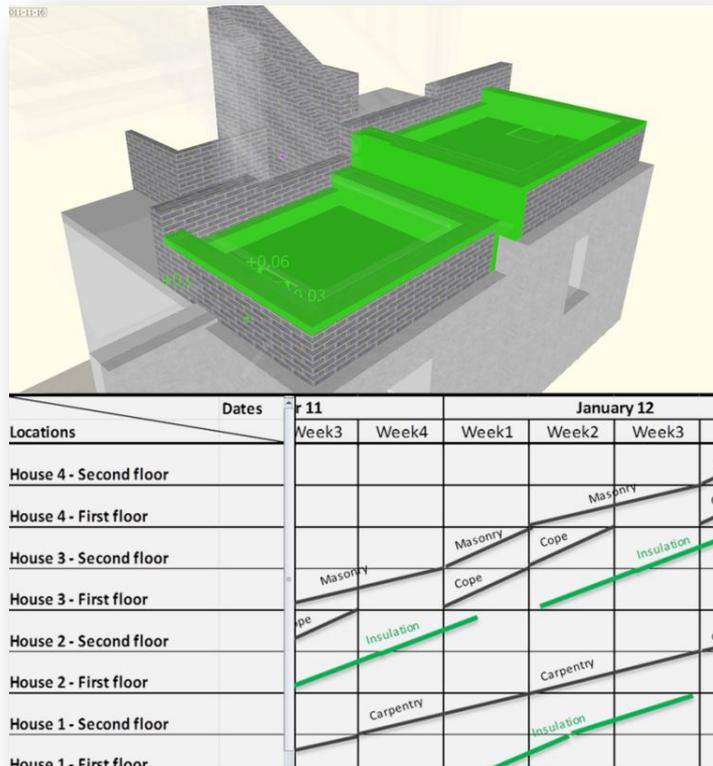


Figure 103 : Maquette de la vue proposée au sous-traitant en isolation

7.2 Intérêt des vues proposées

Les vues proposées en utilisant notre méthode sont théoriquement les plus adaptées aux besoins des différents acteurs. Mais pour nous en assurer véritablement, une validation *ex post* auprès d'autres professionnels du secteur de la construction est nécessaire. Un protocole expérimental a donc été mis en place. Nous présentons dans cette partie le protocole et les résultats obtenus.

7.2.1 Protocole d'enquête

7.2.1.1 Le mode opératoire

L'objectif principal est d'évaluer la pertinence des vues proposées dans l'étude de cas présentée plus haut. Le mode opératoire a consisté en une enquête en ligne. À cet effet, un questionnaire a été réalisé et soumis à un large échantillon de professionnels du secteur de la construction. Le questionnaire est rédigé en trois langues différentes : le français, l'anglais et l'allemand.

Une première version du questionnaire a été testée sur un petit échantillon de trois professionnels aux profils différents, afin de s'assurer que les questions sont bien formulées et compréhensibles. Les observations reçues ont permis d'effectuer des améliorations et d'aboutir à une version finale. Le

questionnaire, en trois langues, a alors été saisi dans l'outil de gestion d'enquête LimeSurvey⁹ et mis en ligne.

Une invitation ouverte a été postée sur les pages de quelques groupes du réseau social professionnel LinkedIn, relatifs au secteur de la construction. Il s'agit notamment des groupes *Linking Construction*¹⁰, *4D Construction Sequencing and Simulation*¹¹ et *CIB W78 - IT for Construction*.¹²

7.2.1.2 Contenu du questionnaire

Le questionnaire est structuré en trois parties : les informations personnelles, la connaissance des techniques de planification, et la pertinence des vues proposées.

La première partie consiste à connaître l'intéressé, à travers son métier. L'indication du nom et de l'adresse précise est facultative.

Dans un deuxième temps, il s'agit d'évaluer la connaissance par les professionnels des principales techniques de représentation du planning. À cet effet, le questionnaire part d'un petit rappel de ces techniques avant de demander aux répondants s'ils les connaissent ou pas, et s'ils les ont déjà utilisées au moins une fois dans le cadre de leurs activités professionnelles.

Dans la troisième partie du questionnaire, après un texte d'introduction présentant le scénario de chantier inspiré du cas d'études précédent, les professionnels sont alors invités à évaluer la pertinence des vues proposées par rapport aux besoins identifiés pour les différents acteurs, et à se prononcer sur la pertinence de besoins identifiés, en se basant sur leur expérience personnelle dans le secteur de la construction.

Le questionnaire complet peut être consulté en annexe du présent mémoire (Annexe 2).

7.2.1.3 Profils des personnes ayant répondu à l'enquête

Au total, vingt-cinq (25) professionnels ont répondu au questionnaire. Neuf (9) d'entre eux se situent du côté de la maîtrise d'œuvre, huit (8) sont du côté de l'entreprise et huit (8) autres sont du côté de la maîtrise d'ouvrage.

⁹ <http://www.limesurvey.org>

¹⁰ http://www.linkedin.com/groups?gid=95282&trk=anet_ug_hm

¹¹ http://www.linkedin.com/groups?gid=1777179&trk=hb_side_g

¹² http://www.linkedin.com/groups?gid=3696967&trk=hb_side_g

Tableau 28 : Types et nombre de professionnels ayant participé à l'enquête

Type de professionnel	Nombre de participants
Maître d'ouvrage	08
Maître d'oeuvre	09
Entreprise	08
Total	25

Parmi ces 25 personnes, 21 professionnels ont répondu à toutes les questions de l'enquête. Les quatre autres ont répondu uniquement aux premières questions, relatives à la connaissance et l'utilisation des techniques.

7.2.2 Résultats de l'enquête

Nous présentons ici les résultats de l'expérimentation, en axant l'analyse autour des trois principales interrogations : la connaissance des techniques de représentation du planning, la pertinence des besoins identifiés, et la pertinence des vues proposées.

7.2.2.1 Connaissance des techniques de représentation du planning

Le premier enseignement de l'enquête menée concerne la connaissance des techniques de représentation du planning. Il s'agit de savoir si les principales techniques présentées sont connues et utilisées par les professionnels interrogés. Globalement, il en ressort que le diagramme de Gantt est connu et utilisé par tous. Cent pour cent (100 %) des professionnels interrogés estiment en effet le connaître et l'avoir déjà utilisé. Le réseau PERT quant à lui est un peu moins connu. Soixante-huit pour cent (68 %) des professionnels le connaissent et vingt-quatre pour cent (24 %) l'ont déjà utilisé. La technique la moins connue est la planification linéaire. Seulement trente-deux pour cent (32 %) des personnes interrogées la connaissent et quatre pour cent (4 %) l'ont utilisée (voir Figure 104).

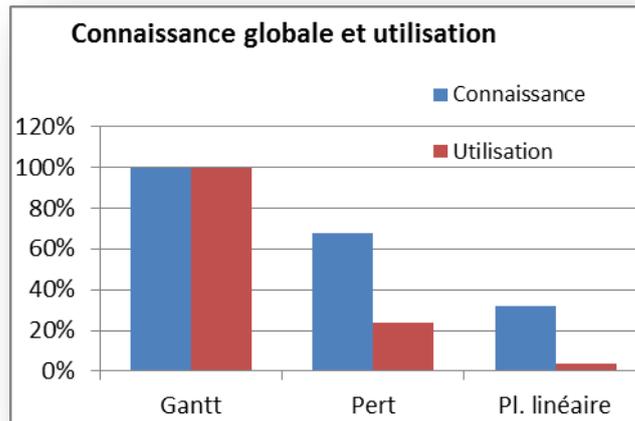


Figure 104 : Connaissance et utilisation des techniques de planification

Il est intéressant de comprendre les détails de cet enseignement, en étudiant notamment la connaissance de ces techniques par type d'acteurs interrogés. Tous les acteurs (de tous types) affirment connaître le diagramme de Gantt et l'avoir déjà utilisé. En ce qui concerne les autres techniques, des différences existent.

La moitié des maîtres d'ouvrages (50 %) connaissent et ont déjà utilisé le réseau PERT. Un quart (25 %) d'entre eux connaissent la planification linéaire, mais seulement treize pour cent (13 %) d'entre eux l'ont déjà utilisée (voir Figure 105).

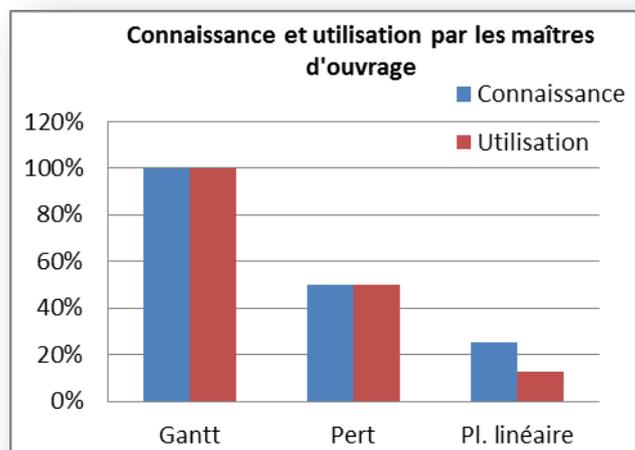


Figure 105 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les maîtres d'ouvrage

Plus des trois quarts des maîtres d'œuvre (78 %) connaissent le réseau PERT mais seulement onze pour cent (11 %) d'entre eux l'ont déjà utilisé. Quarante-quatre pour cent (44 %) affirment connaître la planification linéaire, mais personne parmi eux ne l'a utilisée (voir Figure 106).

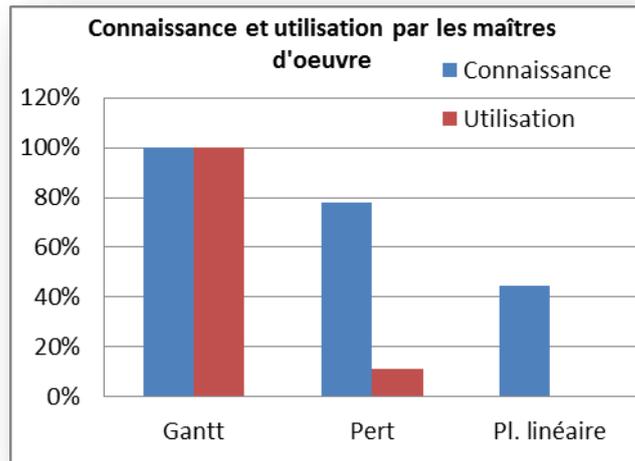


Figure 106 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les maîtres d'oeuvre

Trois quarts (75 %) des entreprises affirment connaître le réseau PERT mais treize pour cent (13 %) seulement l'ont déjà utilisé. Un quart (25 %) connaissent la planification linéaire sans l'avoir jamais utilisée (voir Figure 107).

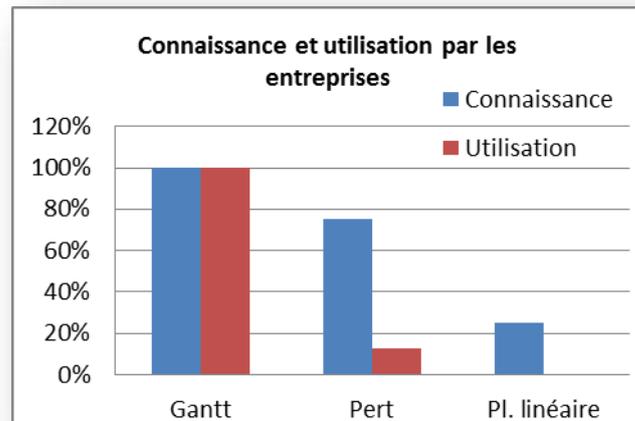


Figure 107 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les entreprises

Avant d'aller plus loin, nous pouvons déjà conclure ici que les vues métiers telles que le diagramme de Gantt et le réseau PERT sont bien connues des professionnels. Mais le diagramme de Gantt est plus connu et beaucoup plus utilisé que le réseau PERT. Quant à la planification linéaire, elle est largement moins connue et moins utilisée. Cet enseignement confirme le besoin que nous avons établi d'intégrer dans le métamodèle de vue métier, le niveau auquel la représentation visuelle est connue (inconnue, peu connue, ou très connue) et utilisée (utilisée ou pas utilisée).

7.2.2.2 Pertinence des besoins identifiés pour les différents acteurs

Besoins identifiés pour le superviseur (voir Figure 108) :

Les besoins identifiés pour le superviseur ont été jugés pertinents par quatre-vingt-onze pour cent (91 %) des professionnels ayant répondu au questionnaire. En effet, soixante-sept pour cent (67 %) ont dit un « oui » définitif tandis que vingt-quatre pour cent (24 %) ont émis quelques réserves en répondant par « oui, mais ».

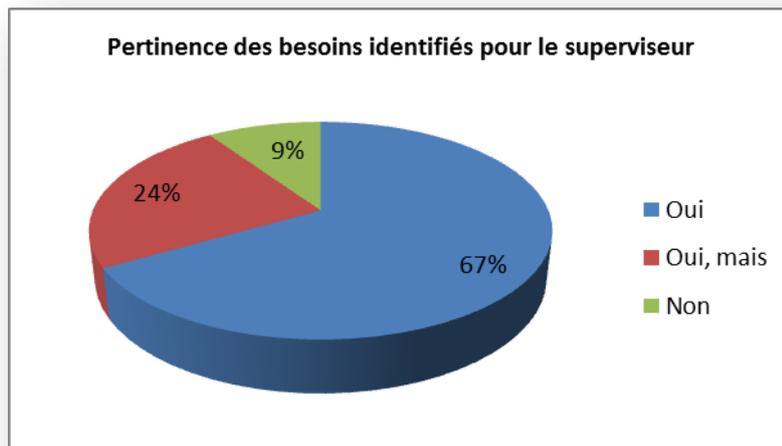


Figure 108 : Pertinence des besoins identifiés pour le superviseur

Au nombre des réserves émises, nous pouvons mentionner le fait que certains professionnels pensent qu'il « ne s'agit pas uniquement de coordonner dans le temps » et que l'intégration d'autres ressources telles que le « plan de gestion des différentes ressources nécessaires peut s'avérer d'une grande utilité ». Ces remarques sont évidemment bien fondées et justifient un besoin de passer d'une simulation 4D vers une simulation nD. Dans le cadre de l'étude de cas réalisé, nous sommes restés strictement dans le cadre de la simulation 4D (3D+Planning).

Besoins identifiés pour l'entreprise A (voir Figure 109) :

En ce qui concerne la pertinence des besoins identifiés pour l'entreprise A, nous sommes dans les mêmes proportions de validation que pour le superviseur. Quatre-vingt-dix pour cent (90 %) des personnes les jugent pertinentes.

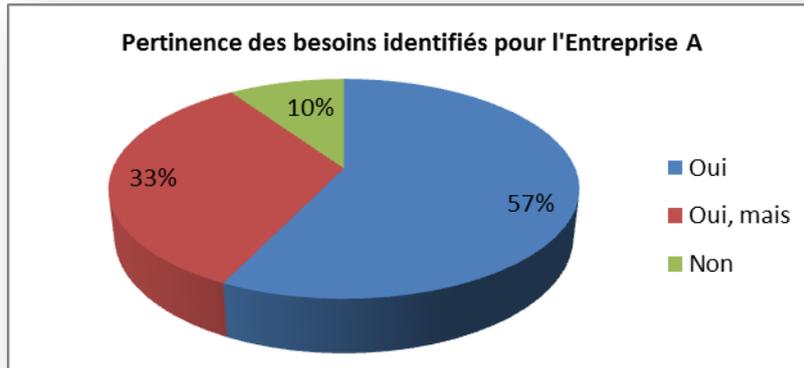


Figure 109 : Pertinence des besoins identifiés pour l'entreprise A

Les principales observations faites se rapportent au fait qu'il serait utile, selon certains professionnels, de rajouter à ces besoins « le nom et la nature des autres intervenants », « des indications sur les contraintes spatiales », ce qui inclut « les autres corps de métier à entretenir en parallèle (perçements, etc.) ».

Besoins identifiés pour l'entreprise B (voir Figure 110) :

Quatre-vingt-dix pour cent (90 %) des personnes ayant répondu estiment que les besoins identifiés pour l'entreprise B sont pertinents. Cinquante-sept pour cent (57 %) pensent que ces besoins sont clairement bien identifiés, et trente-trois pour cent les trouvent pertinents, mais avec des commentaires. Dix pour cent (10 %) les jugent non pertinents.

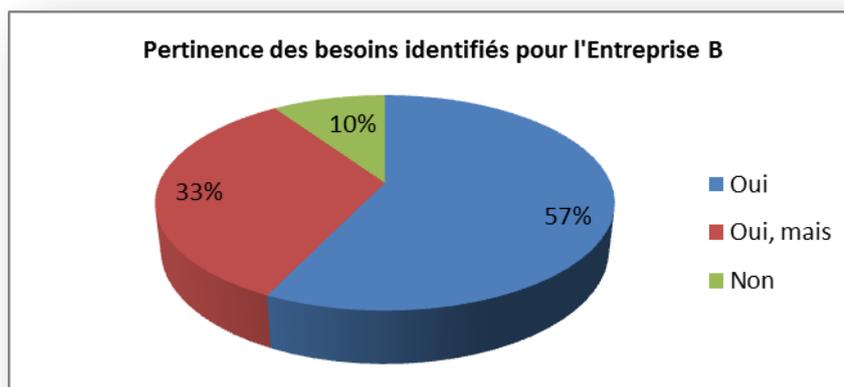


Figure 110 : Pertinence des besoins identifiés pour l'entreprise B

Dans les commentaires, les professionnels proposent d'ajouter l'information relative au matériel, aux détails d'exécution, « le moyen d'identifier quelle équipe travaille », « le travail inter-équipes dans une même entreprise » et « combien de fois les équipes devront revenir ». Ces remarques, loin de s'opposer aux besoins que nous avons identifiés, les confirment dans la mesure où on en déduit que

le besoin d'organisation des équipes de travail et de la localisation spatiale est au cœur des préoccupations liées au rôle de l'entreprise B, contrairement à celles liées aux rôles du superviseur ou de l'entreprise A.

7.2.2.3 Pertinence des vues proposées aux différents acteurs

Les professionnels ont également été invités à juger de la pertinence des vues proposées aux différents acteurs en fonction de leurs besoins. Nous présentons ici les résultats de ces évaluations.

Pertinence de la vue proposée au superviseur (voir Figure 111) :

La vue proposée au superviseur a été jugée très appropriée par quarante-trois pour cent (43 %) des professionnels et satisfaisante par trente-huit pour cent (38 %) d'entre eux. Par contre, dix-neuf pour cent (19 %) la jugent peu appropriée. Notons que personne ne l'a trouvée inappropriée.

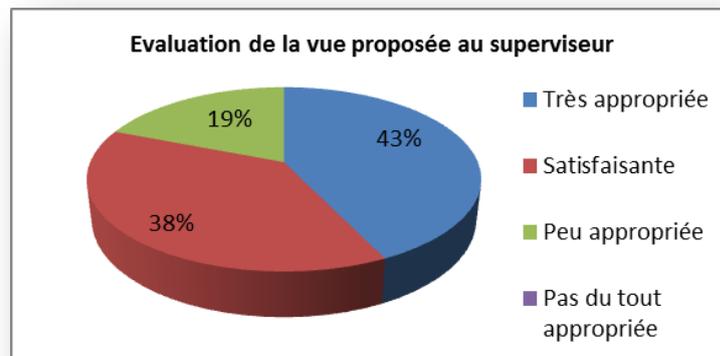


Figure 111 : Pertinence de la vue proposée au superviseur

Les principales critiques recensées découlent de la perception des besoins identifiés pour cet acteur. Ainsi, certains ont proposé d'ajouter des « détails sur les éléments générant l'ensemble du projet », incluant des « notes de processus pour chaque séquence et des niveaux de validation liés à la qualité, au coût et à la durée », car « il ne s'agit pas de coordonner uniquement dans le temps ». Mais comme nous l'avons dit en commentant les besoins, dans le cadre de l'étude de cas, nous sommes restés uniquement dans le cadre de la 4D et un modèle nD aurait effectivement pu intégrer ces différents éléments. Un professionnel a indiqué qu'il « faudrait la coupe des raccords pour savoir qui doit intervenir quand ». Un autre commentaire a porté sur le fait que cette vue « ne donne pas une vue globale » du travail à faire. Deux leçons sont à tirer d'un tel commentaire : 1) il traduit une compréhension du besoin du superviseur, qui correspond à celui que nous avons identifié, et 2) il montre une méconnaissance du réseau PERT et/ou une mauvaise perception du mécanisme d'interaction associé, car cette vue est justement conçue pour réaliser le besoin qu'évoque l'auteur du commentaire.

Pertinence de la vue proposée à l'entreprise A (voir Figure 112) :

La vue proposée à l'entreprise A a été jugée très appropriée par quarante-trois pour cent (43 %) des personnes ayant répondu, et satisfaisante par quarante-trois pour cent (43 %). Neuf pour cent (9 %) ont estimé qu'elle est peu appropriée, et cinq pour cent (5 %) l'ont trouvée inappropriée.

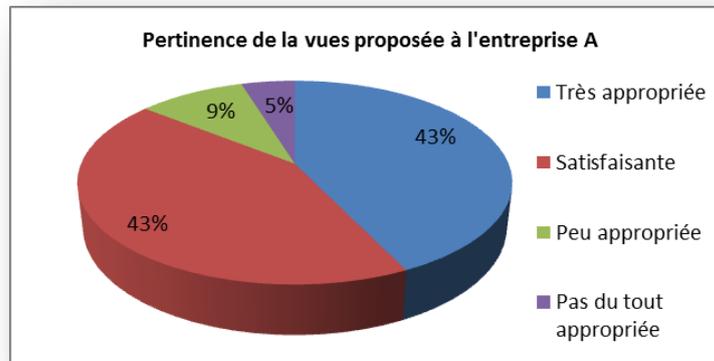


Figure 112 : Pertinence de la vue proposée à l'entreprise A

Comme dans le cas de la vue proposée au superviseur, la plupart des commentaires sont liés aux besoins identifiés pour cet acteur. Un professionnel a trouvé que l'information présentée dans cette vue est minimale et un autre a indiqué qu'elle devrait fournir plus d'informations pour « appréhender les problèmes spatiaux liés à l'activité de l'entreprise ». Un autre professionnel a proposé d'y intégrer des informations comme « les types d'étanchéité, les couches à poser, les étapes de soudure des pax ». Selon un autre encore, la vue devrait afficher des « indications sur les autres corps de métier à entretenir en parallèle (percements, etc...) ». Ces différents commentaires peuvent permettre notamment d'approfondir la notion de besoin d'information, telle que perçue par les professionnels du domaine, de manière à mieux orienter les perspectives de la présente recherche.

Pertinence de la vue proposée à l'entreprise B (voir Figure 113) :

La plupart des professionnels jugent que la vue proposée à l'entreprise B est appropriée. En effet, vingt-neuf pour cent (29 %) d'entre eux la trouvent très pertinente, cinquante-deux pour cent (52 %) la jugent satisfaisante, et dix-neuf pour cent (19 %) la trouvent peu appropriée.

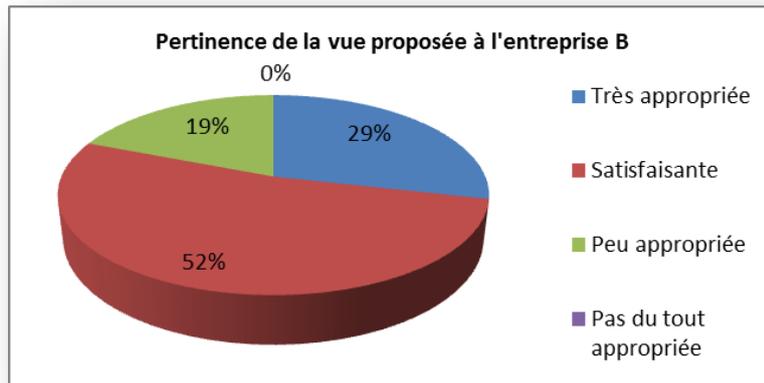


Figure 113 : Pertinence de la vue proposée à l'entreprise B

Un certain nombre de remarques ont été faites. Un professionnel a par exemple suggéré de répondre, à travers cette vue, à la question suivante : « comment faire pour planifier les différentes équipes de la même entreprise ? » Cela montre que la vue n'a pas été très bien comprise par tous les professionnels et nécessite donc encore des améliorations, car cette question est au cœur du besoin ayant conduit à la proposition de la planification linéaire. Un autre professionnel indique préférer le digramme de Gantt et un autre pense que les détails présentés « ne sont pas nécessaires pour répondre au besoin de l'entreprise B. L'indication simple des dates de fin par maison de l'entreprise précédente est suffisante ». Il faut remarquer ici que la planification linéaire suscite moins l'adhésion des professionnels que les autres représentations du planning. Cela peut s'expliquer par le fait qu'elle est de loin la moins connue et la moins utilisée.

7.3 Discussions et bilan du chapitre

Nous avons montré dans ce chapitre, par l'étude d'une situation de planification sur un chantier réel, comment la méthode proposée peut être utilisée pour concevoir des vues 4D adaptées aux besoins métiers des différents acteurs. La situation collaborative a pu être écrite, ainsi que les besoins de visualisation de chacun. Des vues métiers appropriées ont été choisies et ont permis de composer des vues multiples coordonnées 4D adaptées aux besoins de chaque acteur. Cette étude de cas permet de répondre à nos trois hypothèses formulées plus haut :

1. Il est possible de proposer des représentations adaptées aux besoins métier de chacun des acteurs impliqués dans une simulation collaborative 4D/nD ;
2. Proposer des représentations adaptées aux besoins des acteurs suppose le choix de plusieurs vues métiers complémentaires correspondant à ces besoins ;
3. Pour un acteur donné, il est possible de coordonner les vues métiers complémentaires choisies et leur associer des mécanismes appropriés d'interaction pour supporter ses besoins analytiques.

Toutefois, si nous avons réussi à montrer comment les vues métiers peuvent être coordonnées, nous ne sommes pas allés très loin dans le choix des mécanismes d'interaction. La troisième hypothèse n'est donc validée que partiellement, et ouvre des perspectives pour les travaux futurs.

Par ailleurs, il était essentiel de valider la pertinence des vues proposées ainsi que celle des besoins métiers identifiés. À cet effet, à travers les résultats de l'enquête en ligne réalisée, les professionnels ont pu apprécier l'intérêt de ces résultats. Il en ressort que les vues proposées sont assez pertinentes et que les besoins identifiés le sont aussi. La connaissance des techniques de planification influence beaucoup le jugement des professionnels et certaines techniques sont encore peu connues par certains corps de métier. C'est le cas de la planification linéaire et dans une moindre mesure, du réseau PERT. Les vues 4D basées sur ces techniques sont jugées un peu moins pertinentes par les professionnels de ces corps de métier.

Les commentaires des professionnels interrogés nous donnent des pistes en matière de besoins métiers non encore traités. Ces pistes souvent très intéressantes permettent d'améliorer la méthode proposée et ouvrent aussi des perspectives intéressantes pour la présente thèse.

Conclusion

Cette partie présente les conclusions générales de notre recherche. Nous y présentons un résumé de la problématique, la démarche scientifique suivie, les propositions originales formulées, les limites de la recherche effectuée ainsi que les perspectives qu'elle ouvre pour des travaux futurs.

La problématique

Dans ce travail, nous avons étudié les pratiques de planification dans le secteur de la construction et l'utilisation de la simulation 4D comme support à ces pratiques. La planification de la construction est une activité qui implique généralement plusieurs professionnels qui doivent collaborer/coopérer pour réaliser le planning. Elle est caractérisée par la notion de multiplicité. Cette notion se rapporte au fait que plusieurs acteurs sont impliqués, mais aussi à l'existence d'une diversité de méthodes de planification de la construction, d'une diversité de temporisation et d'horizons de planification, et d'une diversité de techniques de représentation du planning.

La simulation 4D comme support à l'activité de planification de la construction doit tenir compte, non seulement des particularités du secteur, mais également du caractère collaboratif de la planification et des besoins de chaque participant. La visualisation étant très importante dans la simulation, un accent particulier doit être mis sur la prise en compte des besoins de visualisation. Nous avons montré dans cette thèse qu'il est possible de proposer des vues adaptées aux besoins de chacun. Une telle adaptation implique le choix de plusieurs vues métiers complémentaires correspondant aux besoins d'information de chaque professionnel. Il est possible de coordonner ces vues complémentaires et de leur associer des mécanismes appropriés de coordination et d'interaction.

L'apport original

Un certain nombre de prises de position et de propositions originales sont formulées dans la présente thèse. Nous insistons ici sur celles relatives à la conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD, l'établissement du besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation 4D/nD, la proposition d'une méthode de conception de vues nD adaptées, et la proposition de métamodèles comme langage structuré pour l'utilisation de la méthode.

Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD

En exploitant les théories sur la simulation et des études précédentes sur l'activité collective dans le secteur de la construction, nous réalisons une conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD de la construction (chapitre 5). Ce travail permet de définir la simulation collaborative 4D/nD de la construction comme consistant à réaliser, de manière collaborative et/ou pour assister la collaboration, un modèle 4D/nD de l'ouvrage à construire. Nous avons montré comment un modèle 4D/nD peut être utilisé pour assister la collaboration entre différents acteurs. Nous avons également montré que la réalisation collaborative met l'accent sur l'interaction dans un environnement en réseau, où un modèle 3D partagé est accessible à tous les membres de l'équipe de planification de manière à favoriser une session de planification collaborative. Le modèle 3D constitue donc un point de départ commun permettant à des acteurs de plusieurs disciplines de se connecter et de réaliser leur travail de planification en se concentrant chacun sur différents aspects de la planification.

Mais la conceptualisation proposée fait également ressortir des éléments importants à prendre en compte pour répondre à la problématique d'adaptation des outils de simulation collaborative 4D/nD. On y retrouve notamment l'importance de la visualisation, les différents types de rôles impliqués, les éléments permettant de décrire le contexte de chacun, etc.

Besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD

L'étude des pratiques et des méthodes de planification dans le secteur de la construction permet d'établir que les acteurs d'une activité collaborative de planification ont des besoins différents liés à leur rôle dans le projet de construction. Par ailleurs, plusieurs modes de représentation (correspondant aux « vues métiers ») sont utilisés et les professionnels du secteur choisissent l'un ou l'autre d'entre eux en fonction de leurs besoins particuliers.

Le but principal de la simulation 4D/nD de la construction étant de supporter la planification de la construction, les vues proposées aux utilisateurs doivent se baser sur celles traditionnellement utilisées par les professionnels dans leur travail de planification. Nous avons montré dans cette thèse qu'il est important et possible, dans le cadre d'une simulation collaborative 4D/nD de la construction, de concevoir et de proposer des vues adaptées (basées sur les vues métiers) à chaque utilisateur impliqué.

Les simulations 4D/nD comme systèmes de vues multiples coordonnées

Une prise de position importante dans le cadre de la présente thèse a consisté à considérer les simulations 4D/nD comme étant des systèmes de vues multiples coordonnées. Nous avons justifié une telle position par le fait que de manière générale, les simulations 4D/nD respectent les règles de « diversité » et de « complémentarité » énoncées par Wang Baldonado et *al.* (2000) dans la mesure où elles affichent des contenus aux attributs divers et elles mettent en évidence des corrélations entre ces contenus. Dans une simulation 4D, les éléments de l'ouvrage de la vue 3D sont liés aux tâches de construction correspondantes de la vue Planning. De plus, des portions similaires ou différentes de l'information peuvent y être affichées par des vues différentes étroitement coordonnées de diverses manières de telle sorte que l'interaction sur une composante cause des effets significatifs dans les autres.

L'intérêt principal de considérer les simulations 4D/nD comme des systèmes de vues multiples coordonnées réside dans le fait qu'il est ainsi possible d'appliquer certaines théories développées dans les domaines scientifiques de la Visualisation de l'Information et des Vues Multiples Coordonnées pour les décrire. Cette description est essentielle dans la mesure où elle permet de manipuler les concepts sous-jacents (contenu, structures de représentation, principes d'interaction, mécanismes de coordination, etc.) et de proposer des modèles conceptuels nécessaires pour l'amélioration de la visualisation dans les interfaces de simulation 4D/nD.

Proposition d'une méthode de conception de vues nD adaptées

Pour concevoir des vues adaptées aux besoins réels des acteurs impliqués dans une situation de simulation collaborative 4D/nD de la construction, nous proposons une méthode en quatre étapes. Les simulations 4D/nD ne sont plus considérées comme étant de simples animations, mais comme étant des systèmes de vues multiples coordonnées. Cela permet de les décrire en utilisant des notions théoriques issues du champ scientifique de la visualisation de l'information. Il est ainsi possible de choisir plusieurs vues métiers correspondant à des besoins différents d'un même acteur, et de les coordonner de manière à lui proposer un système de vues multiples coordonnées nD approprié. La méthode s'adresse non seulement aux concepteurs/éditeurs d'outils de simulation collaborative 4D/nD de la construction, mais également à des professionnels et autres experts de la planification de la construction. L'objectif est de les guider dans l'étude des besoins des utilisateurs potentiels et de choisir les vues métiers les plus appropriées aux besoins traités.

Il convient de préciser qu'un des intérêts de cette méthode réside dans la démarche de conception qui englobe à la fois la situation collaborative, les besoins réels des acteurs impliqués, les vues métiers, pour définir enfin les vues multiples coordonnées adaptées. La méthode a été validée dans son ensemble par une expérimentation où elle a été développée sur la planification d'un chantier réel. Les résultats obtenus ont été confrontés, à travers une enquête en ligne, à l'avis de professionnels du secteur afin de valider leur pertinence.

Des métamodèles comme langage structuré pour l'utilisation de la méthode

Pour rendre opérationnelle la méthode proposée, il est important de fournir aux utilisateurs de la méthode un langage structuré permettant de concevoir progressivement des vues multiples nD adaptées à travers les étapes de la méthode. À cet effet, nous avons suivi les principes de l'Ingénierie

Dirigée par les Modèles (IDM) recommandant l'utilisation de métamodèles pour s'assurer que les modèles réalisés pour décrire un système sont conformes à un langage défini.

Nous avons donc conçu des métamodèles pour supporter les différentes étapes de la méthode. Il s'agit des métamodèles de situation collaborative, de tâches de visualisation, de vues métiers, et de vues multiples coordonnées. Ces métamodèles ont été initialement réalisés sur la base d'un recul théorique sur la Visualisation de l'Information et le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur. Ils ont ensuite été confrontés à des visualisations 4D réelles déjà produites dans le cadre de projets de construction, afin d'affiner progressivement leur contenu ainsi que la cohérence des étapes de la méthode.

Par ailleurs, une base de données de vues métiers a été réalisée, qui permet de recenser de manière systématique les vues métiers existantes, décrites suivant le métamodèle proposé. Pour traiter la question de la mise en correspondance des vues métiers avec des besoins donnés, de manière à en sélectionner les plus appropriées, nous avons proposé une formule (ou fonction de mise en correspondance) permettant de calculer le niveau d'adaptation d'une vue par rapport à un besoin.

Proposition d'une vue 4D originale

L'utilisation de la méthode que nous proposons permet d'étudier une situation de simulation collaborative 4D/nD et de proposer des vues appropriées aux besoins des acteurs identifiés. Elle contribue à l'amélioration des outils existants, notamment en permettant de choisir des vues métiers appropriées. Elle peut également conduire à la définition de vues innovantes et totalement inédites correspondant à des besoins particuliers étudiés.

L'étude de cas que nous avons menée sur un chantier réel nous a conduit à définir une forme de vue 4D innovante. Cette vue, présentée sur la Figure 102 permet d'utiliser un système de couleurs et d'attributs graphiques pour mettre l'accent sur les activités en cours, celles se passant avant l'activité en cours, et aussi celles devant se dérouler juste après. Il s'agit d'une proposition nouvelle dans la mesure où la vue 3D dans les simulations 4D actuelles ne représente quasi jamais les activités à venir, se contentant de leur appliquer une transparence totale qui les rend invisibles. Or, comme nous l'avons compris dans notre étude, certaines entreprises peuvent avoir besoin de visualiser les ouvrages devant être réalisés juste après leur passage, de manière à mieux comprendre comment réaliser les attentes et autres réservations. Ceci est d'ailleurs confirmé par l'enquête en ligne réalisée, notamment en ce qui concerne la validation de cette représentation 4D et des besoins ayant conduit à sa construction.

Limites et perspectives de la recherche

Nous faisons état ici d'un certain nombre de limites que présente le travail de recherche présenté dans cette thèse.

Limites liées à l'interdisciplinarité de l'approche

La première limite de notre travail réside dans son aspect hautement interdisciplinaire intégrant des notions de plusieurs disciplines scientifiques : Architecture, Ingénierie et Construction ; Visualisation de l'Information ; Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur ; Visualisation Collaborative, Ingénierie Dirigée par les Modèles. Cette interdisciplinarité ne permet évidemment pas de traiter chacune des théories manipulées en tenant compte de toute la sociologie qui lui est liée. En effet, comme le dit justement E. Morin, chaque discipline tend à l'autonomie « par délimitation de ses frontières, le langage qu'elle se constitue, les techniques qu'elle est amenée à élaborer ou à utiliser, et éventuellement par les théories qui lui sont propres » (Morin 1994).

Le recul théorique que nous avons effectué vers les domaines scientifiques de la Visualisation et du Travail Collaboratif a été pour nous l'occasion de découvrir une littérature riche dont nous avons retenu de n'adapter et de n'utiliser que la partie (certainement infime) correspondant à nos besoins spécifiques, et de manière assez pragmatique. Sans vraiment apporter des contributions significatives à ces disciplines scientifiques, nous apportons quand même des cas d'application et des situations métiers permettant d'étendre les champs d'application.

Par ailleurs, il a été nécessaire de trouver des équivalences entre certains concepts utilisés. Ces concepts n'ayant pas toujours les mêmes définitions d'un domaine scientifique à l'autre, nous avons parfois dû trouver des "dénominateurs communs". Une telle recherche de compromis peut s'avérer parfois réductrice, surtout pour les disciplines dans lesquelles ces concepts sont cruciaux et fortement élaborés.

Au-delà de ces considérations, il faut reconnaître que l'interdisciplinarité a été un vrai atout pour notre approche scientifique dans la mesure où il eût été impossible de répondre à nos questionnements en restant cloisonné dans un seul domaine scientifique. En effet, « la frontière disciplinaire, son langage et ses concepts propres vont isoler la discipline par rapport aux autres et par rapport aux problèmes qui chevauchent les disciplines » (Morin 1994).

Limites dans la prise en compte des dimensions psychologiques et ergonomiques ainsi que des techniques d'interaction homme-machine

D'autres limites de notre travail concernent directement les propositions faites. Parmi elles, il faut noter la non-prise en compte de certains aspects potentiellement intéressants, mais que nous n'avons pas pu traiter, pour diverses raisons.

Dans le raffinement de la problématique et son positionnement par rapport aux trois contextes de l'activité collective (paragraphe 6.1.1.1 du chapitre 6), nous avons mentionné que les vues manipulées par un acteur dans le cadre de l'utilisation d'un outil informatique d'assistance à la collaboration doivent donc être proposées en tenant compte de ses besoins. Et ces besoins concernent, non seulement les besoins d'information, mais également ses prédispositions cognitives externes au projet qui déterminent, consciemment ou non, la manière qu'il a d'appréhender le projet. Mais pour éviter d'embrasser trop d'aspects sans pouvoir bien les traiter, nous nous sommes limités, dans le cadre de nos propositions, aux besoins d'information, car ces besoins sont les plus déterminants dans le choix des vues métiers.

Nous n'avons donc pas pu traiter de manière plus précise les aspects liés à la psychologie des acteurs, ni les dimensions ergonomiques liées à la conception de vues et à leur évaluation. Il serait sans doute intéressant, dans le cadre de travaux futurs, d'étudier l'intégration de ces différents aspects à la méthode proposée pour la conception de vues adaptées.

Tout au long de la présentation de notre problématique et des résultats, l'on a également pu comprendre que les mécanismes interactions constituent une composante importante des vues. En effet, ils permettent de donner la possibilité à l'utilisateur de naviguer à travers la vue et de manipuler les données de manière à faire correspondre le contenu de la vue à la tâche de visualisation qu'il réalise.

Au terme de notre recherche, une question reste sans réponse claire : comment choisir les mécanismes d'interaction les plus appropriés pour un besoin métier donné ? Nous n'avons pas pu y donner une réponse nette, car il s'agit d'une question véritablement complexe. En effet, choisir les mécanismes d'interaction appropriés suppose la prise en compte à la fois :

- des besoins de visualisation de l'utilisateur ;
- du type de support informatique utilisé (ordinateur, smartphone, tablette numérique, etc.) ;
- des exigences ergonomiques des interfaces ;
- du contexte utilisateur ;
- etc.

L'une des perspectives intéressantes à cette recherche consiste donc à étudier ces différents éléments afin de répondre au mieux à la question posée. Cela permettrait de faire un pas supplémentaire vers la proposition de services de visualisations adaptées que nous avons évoqués dans la thèse et qui constituent un objectif de recherche dans la collaboration établie entre le MAP-CRAI et le CRP Henri Tudor.

Limites liées à l'évaluation des propositions

L'évaluation est un aspect important en science de la conception. Elle concerne l'évaluation des résultats de la recherche, c'est-à-dire aussi bien les théories formulées que les artefacts proposés (constructions, modèles, méthodes, instanciations). Dans le cadre de notre recherche, nous avons accordé une place importante à l'évaluation et la validation (*ex post* et *ex ante*) de nos propositions significatives en utilisant des méthodes rigoureuses et en faisant plusieurs itérations lorsque c'était nécessaire.

Malgré cet effort, il faut reconnaître que, pour des raisons diverses (temps, disponibilité des utilisateurs, etc.), certains aspects de nos propositions n'ont pas été suffisamment évalués et validés. Dans notre étude de cas par exemple, l'instanciation de la formule proposée pour attribuer des scores d'adaptation aux vues métiers en fonction d'un besoin particulier (voir paragraphe 7.1.2.3 du chapitre 7) aurait gagné à être validée à travers une enquête auprès de professionnels du secteur, notamment pour définir les valeurs -1, 0, et 1.

De plus, nous avons prévu une expérimentation qualitative dans laquelle des professionnels seraient invités à utiliser directement les vues proposées pour répondre aux besoins identifiés. Une telle

enquête aurait été l'occasion de détecter des aspects non identifiés et aurait grandement contribué à la compréhension des besoins d'interaction des utilisateurs. Dans le délai de nos travaux de thèse, nous n'avons malheureusement pas pu réaliser cette expérimentation dont la pertinence demande une certaine préparation (voir à cet effet les expériences de Kobsa (2001) ou de Tory & Staub-French (2008)). Mais nous pensons à terme pouvoir réaliser cette analyse qui constitue une perspective intéressante.

Références bibliographiques

- Ackoff, R., 1970. A concept of corporate planning. *Long Range Planning*, 3(1), pp.2–8.
- AFITEP-AFNOR, 2010. *Dictionnaire de management de projet*, AFNOR Editions.
- Akinci, B., Fischen, M. & Levitt, R., 2000. Formalization and automation of time-space conflict analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, pp.1–33.
- Arditi, D. & Tokdemir, O., 2002. Challenges in line-of-balance scheduling. *Journal of construction engineering and*, (December), pp.545–557.
- Armand, J., 2000. *140 séquences pour mener une opération de construction*, Collection Méthodes, Le Moniteur, Paris, 290 p.
- Atkinson, R., 1999. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), pp.337–342.
- Austin, S., Baldwin, A., Hammond, J., Murray, M., Root, D., Thomson, D. & Thorpe, A., 2001. *Design Chains: a Handbook for Integrated Collaborative Design*, Loughborough, UK., 240 p.
- Baccarini, D., 1996. The concept of project complexity—a review. *International Journal of Project Management*, 14(4), pp.201–204.
- Ballard, H.G., 2000. *The Last Planner System of Production Control*. University of Birmingham.
- Benali, K., Bourguin, G., David, B., Derycke, A. & Ferraris, C., 2002. Collaboration/Coopération. In *Information-Interaction-Intelligence, Actes des deuxièmes Assises nationales du GDR I3, J. Le Maître (Ed.)*.
- Bertin, J., 1967. *Sémiologie graphique: Les diagrammes, les réseaux, les cartes*, EHESS. Ecole des hautes études en sciences sociales.

- Birell, G.S., 1980. Construction Planning-Beyond the Critical Path. *Journal of the Construction Division, ASCE*, 106(CO3).
- Boukhelifa, N. & Rodgers, P.J., 2003. A model and software system for coordinated and multiple views in exploratory visualization. *Information Visualization*, 2(4), pp.258–269.
- Bourgeois, J., 1997. *Gestion de projet*, Techniques de l'ingénieur.
- Carel, G., 2003. Pour une histoire de la gestion de projet, *Réalités Méconnues*, Gérer et comprendre, n°74, pp. 77–89.
- Chan, A.P.C. & Chan, A.P.L., 2004. Key performance indicators for measuring construction success. *Benchmarking: An International Journal*, 11(2), pp.203–221.
- Chan, A.P.C., Scott, D. & Chan, A.P.L., 2004. Factors affecting the success of a construction project. *Journal of construction engineering and management*, 130(1), pp.153–155.
- Chevallier, N. & Russel, A.D., 1998. Automated schedule generation. *Canadian journal of civil engineering*, 25(6), pp.1059–1077.
- Chi, E. & Riedl, J., 1998. An operator interaction framework for visualization systems. In *InfoVis '98: Symposium on Information Visualization*. Research Triangle Park, North Carolina, pp. 63–70.
- Chi, E.H., 2000. A taxonomy of visualization techniques using the data state reference model. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization*. pp. 69–75.
- Chua, D. & Kog, Y., 1999. Critical success factors for different project objectives. *Journal of Construction Engineering and Management*, (June), pp.142–151.
- Chuah, M.C. & Roth, S.F., 1996. On the semantics of interactive visualizations. In *Proceedings IEEE Symposium on Information Visualization '96*. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 29–36.
- Clayton, M., 2002. Virtual construction of architecture using 3D CAD and simulation. *Automation in Construction*, 11(2), pp.227–235.
- Collier, E. & Fischer, M., 1995. *Four-dimensional modeling in design and construction*. CIFE Technical Report #101, Stanford.
- Constantine, L., 1996. Usage-Centered Software Engineering: New Models, Methods and Metrics. In *Proceedings International Conference Software Engineering: Education and Practice*. Dunedin, pp. 2–9.
- Cooper, A. & Reimann, R.M., 2003. *About Face 2.0: The Essentials of Interaction Design*, John Wiley and Sons.
- David, B., 2001. IHM pour les collecticiels. In H. Guyennet, ed. *Réseaux et systèmes répartis*. Paris, France, pp. 169–206.
- Dawood, N., Sriprasert, E., Mallasi, Z. & Hobbs, B., 2002. Development of an integrated information resource base for 4D / VR construction processes simulation. *Automation in Construction*, 12, pp.123–131.

- Dawood, Nashwan & Sikka, S.S., 2007. Measuring the effectiveness of 4D planning as a valuable communication tool. *ITcon Vol. 13, Special Issue Virtual and Augmented Reality in Design and Construction*, pp.198–205.
- DeSanctis, G. & Gallupe, R.B., 1987. A Foundation for the Study of Group Decision Support Systems. *Management Science*, 33(5), pp.589–609.
- Dietz, A.G.H. & Litle, W.A., 1976. Education for Construction. *Journal of the Construction Division*, 102(2), pp.347–364.
- East, B. & Chipman, T., 2011. *Facility Management Handover Model View Definition*, BuildingSMART.
- Ellis, C.A., Gibbs, S.J. & Rein, G., 1991. Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1), pp.39–58.
- Erl, T., 2004. *Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design*, Prentice Hall, 792 p.
- Favre, J.-M., Estublier, J. & Blay-Fornarino, M., 2006. *L'ingénierie dirigée par les modèles au-delà du MDA*, Lavoisier, Paris, France, 227 p.
- Fischer, M., Stone, M., Liston, K., Kunz, J. & Singhal, V., 2002. Multi-stakeholder collaboration : The CIFE iRoom. In *International Council for Research and Innovation in Buildig and Construction. CIB w78 conference*. Aarhus School of Architecture, pp. 12–14.
- Fishwick, P., 1995. Computer simulation: The art and science of digital world construction. *IEEE Potentials*, pp.1–9.
- Frohlich, B., Fischer, M., Agrawala, M. & Beers, A., 1997. Collaborative production modeling and planning. *Computer Graphics and*, (August), pp.10–15.
- Galloway, P.D., 2006. Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 132(July), pp.697–711.
- Ganah, A., Anumba, C. & Bouchlaghem, N., 2000. A survey on the use of visualization tools to communicate buildability information. In *16th Annual ARCOM Conference*. Glasgow Caledonian University: Association of Researchers in Construction Management, pp. 833–842.
- Garcia, A.C.B., Kunz, J., Ekstrom, M. & Kiviniemi, A, 2004. Building a project ontology with extreme collaboration and virtual design and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2), pp.71–83.
- Giard, V. & Midler, C., 1994. Management et gestion de projet: une étude des mutations en cours. La place économique du projet dans l'entreprise. *Revue française de gestion industrielle. IAE de Paris*.
- Giard, V. & Midler, C., 1996. Management et gestion de projet : bilan et perspectives. *IAE de Paris-Grégor-Cahier de recherche*. Available at: <http://maurer.users.ch/1996-11.pdf> [Accessed May 5, 2012].

- Giboin, A., 2006. *Des "personas" aux "communitas" ou comment représenter des collectifs concrets particuliers pour aider à la conception de systèmes destinés à des collectifs*, Working Paper.
- Giboin, A., 2011. From Individual to Collective Personas. Modeling Realistic Groups and Communities of Users (and not Only Realistic Individual Users). In *ACHI 2011 : The Fourth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. pp. 132–135.
- Gidado, K., 1996. Project complexity: The focal point of construction production planning. *Construction Management and Economics*, 14, pp.213–225.
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., Arboleda, C. & Lee, S., 2009. Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(6), p.391.
- Grimstead, I.J., Walker, D.W. & Avis, N.J., 2005. Collaborative Visualization: A Review and Taxonomy. *Ninth IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, pp.61–69.
- Grudin, J., 1994. Computer-Supported Cooperative Work: History and Focus. *Computer*, 27(5), pp.19–26.
- Guerriero, A., 2009. *La représentation de la confiance dans l'activité collective. Application à la coordination de l'activité de chantier de construction*, Thèse de doctorat, Nancy-Université INPL.
- Haber, R.B. & McNabb, D.A., 1990. Visualization Idioms: A Conceptual Model for Scientific Visualization Systems. In *Visualization in Scientific Computing*. IEEE, pp. 74–93.
- Hanser, D., 2003. Proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, application au domaine du bâtiment, Thèse de doctorat, Nancy-Université INPL.
- Hartmann, T, Gao, J. & Fischer, M, 2008. Areas of application for 3D and 4D models on construction projects. *Journal of Construction Engineering*, 134(10), pp.776–785.
- Hartmann, T. & Fischer, M., 2007. Supporting the constructability review with 3D/4D models. *Building Research & Information*, 35(1), pp.70–80.
- Haymaker, J. & Fischer, Martin, 2001. *Challenges and benefits of 4D modeling on the Walt Disney Concert Hall Project*, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.
- Healey, C.G., 1992. *Visualization of Multivariate Data Using Preattentive Processing*, Working paper, 122 p.
- Healey, C., Kocherlakota, S., Rao, V., Mehta, R., & St Amant, R. (2008). Visual perception and mixed-initiative interaction for assisted visualization design. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 14(2).
- Heesom, D. & Mahdjoubi, L., 2004. Trends of 4D CAD applications for construction planning. *Construction Management and Economics*, 22(2), pp.171–182.

- Hendrickson, C. & Au, T., 1989. *Project management for construction: Fundamental concepts for owners, engineers, architects, and builders*, Department of Civil Engineering Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Hevner, A., March, S., Park, J. & Ram, S., 2004. Design science in information systems research. *Mis Quarterly*, 28(1), pp.75–105.
- Hietanen, J., 2006. IFC Model View Definition Format , pp.1–25.
- Hu, Z. & Zhang, J., 2010. Development of a sub building information model for 4D structural safety analysis during construction. In *ICCCBE 2010, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*.
- Isenberg, P., Elmqvist, N., Scholtz, J., Cernea, D. & Hagen, H., 2011. Collaborative visualization: Definition, challenges, and research agenda. *Information Visualization*, 10(4), pp.310–326.
- Jaafari, A., 1984. Criticism of CPM for project planning analysis. *Journal of construction engineering and management*, 110(2), pp.222–233.
- Johansen, R., 1988. *Groupware: Computer support for business teams*, New York, NY, USA: The Free Press.
- Johnson, G., 1998. Collaborative Visualization. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 32(2), pp.8–11.
- Johnston, D.W., 1981. Linear scheduling method for highway construction. *Journal of the Construction Division*, 107(2), pp.247–261.
- Kang, H., Lho, B. & Kim, Jeong-hoon, 2004. Development of web-based interactive 4D block tower model for construction planning and scheduling education. In *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*.
- Keim, D.A., 2002. Information Visualization and Visual Data Mining. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 8(1), pp.1–8.
- Kelleher, A.H., 2004. *An investigation of the expanding role of the Critical Path*. Virginia Polytechnic Institute and State University..
- Kim, W., Kim, O., Lee, H. & Choi, Y., 2001. Visualized construction process on virtual reality. In *Proceedings Fifth International Conference on Information Visualisation*. IEEE Comput. Soc, pp. 684–689.
- Kirsch-Pinheiro, M., 2006. *Adaptation Contextuelle et Personnalisée de l'Information de Conscience de Groupe au sein des Systèmes d'Information Coopératifs*, Thèse de Doctorat, Laboratoire Logiciels, Systèmes, Réseaux. Université Joseph Fourier - Grenoble 1.
- Kobsa, A., 2001. An empirical comparison of three commercial information visualization systems. In *IEEE Symposium on Information Visualization, 2001. INFOVIS 2001*. Ieee, pp. 123–130.
- Koontz, H, O'Donnell, C. & Weihrich, H., 1980. *Management*, McGraw Hill Publishing Company.
- Koontz, Harold, 1980. Theory Management Jungle Revisited, 5(2), pp.175–187.

- Ku, K., Pollalis, S., Fischer, M. & Shelden, D., 2008. 3D model-based collaboration in design development and construction of complex shaped buildings. *ITcon*, 13(September 2007), pp.458–485.
- Kubicki, S., Guerriero, A., Leclercq, P., Nys, K. & Halin, G., 2012. 4D modeling and simulation for the teaching of structural principles and construction techniques. In H. Achten et al., eds. *Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference - Volume 1*. Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture (Czech Republic), pp. 87–95.
- 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, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Kubicki, S. & Botton, C., 2011. 4D-based Teaching of High-rise Structural Principles. In *Proceedings of the CIB W78-W102 2011 International Conference*. Sophia Antipolis.
- Kubicki, S., Halin, G. & Guerriero, A., 2007. Multi-visualization of the Cooperative Context in Building Construction Activity A Model-Based Approach to design AEC-specific Visualization Interfaces. *2007 11th International Conference Information Visualization (IV '07)*, pp.590–595.
- Kuljis, J. & Paul, R.J., 2001. Visualization and Simulation: Two Sides of the Same Coin? *Simulation*, 77(3-4), pp.141–152.
- Kuniavsky, M., 2004. Extending a Technique: Group Personas. Available at: http://www.boxesandarrows.com/view/extending_a_technique_group_personas.
- Kuo, C.-H., Tsai, M.-H. & Kang, S.-C., 2011. A framework of information visualization for multi-system construction. *Automation in Construction*, 20(3), pp.247–262.
- Kvan, T., 2000. Collaborative design: what is it? *Automation in Construction*, 9(4), pp.409–415.
- Lange, S., Schumann, H., Müller, W., & Krömker, D. (1995). Problem-oriented visualisation of multi-dimensional data sets. In R. Scateni (Ed.), *Information and Scientific Visualization* (pp. 1–14). Singapore.
- Larkin, J.H. & Simon, H., 1987. Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words. *Cognitive Science*, 11, pp.65–99.
- Laufer, A & Tucker, R.L., 1988. Competence and timing dilemma in construction planning. *Construction management and economics*, 6, pp.339–355.
- Laufer, A., Shapira, A. & Cohenca-Zall, D., 1992. *The Process of Construction Planning and its Products: Practice in Mature Companies.*, Haifa, Israel.
- Laufer, A., Tucker, R.L., Shapira, A. & Shenhar, A.J., 1994. The multiplicity concept in construction project planning. *Construction Management and Economics*, 12(1), pp.53–65.
- Laufer, Alexander & Tucker, R., 1987. Is construction project planning really doing its job? A critical examination of focus, role and process. *Construction Management and Economics*, 5(3), pp.243–266.

- Lee, A., Aouad, G., Cooper, R., Fu, C., Marshall-Ponting, A.J., Tah, J. & Wu, S., 2005. nD modelling-a driver or enabler for construction improvement? *RICS Research Paper Series, RICS, London*, 5(6), pp.1–16.
- Li, B., Austin, S. & Thorpe, T., 2006. Mangement and Planning of a Collaborative Construction Planning Process. In *The International Conference on Asia-European Sustainable Urban Development*. Chongqing, China.
- Li, L.W.F., Li, F.W.B. & Lau, R.W.H., 2006. A trajectory-preserving synchronization method for collaborative visualization. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 12(5), pp.989–96.
- Lim, C. & Mohamed, M.Z., 1999. Criteria of project success: an exploratory re-examination. *International Journal of Project Management*, 17(4), pp.243–248.
- Liston, K. & Fischer, M., 2000. Designing and evaluating visualization techniques for construction planning. *Computing in Civil and Building*, pp.1–8.
- Liston, K.M., 1999. Designing 4D contexts for construction planners. In *CHI '99: CHI '99 extended abstracts on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA: ACM, pp. 65–66.
- Lohse, G.L., Biolsi, K., Walker, N. & Rueter, H., 1994. A classification of visual representations. *Commun. ACM*, 37(12), pp.36–49.
- Lumsden, P., 1968. *The Line Of Balance Method*, Oxford: Pergamon Press.
- Lutz, J.D. & Hijazi, A., 1993. Planning repetitive construction: current practice. *Construction management and economics*, 11(2), pp.99–110.
- Lyytinen, K.J. & Ngwenyama, O.K., 1992. What does computer support for cooperative work mean? a structural analysis of computer supported cooperative work. *Accounting, Management and Information Technologies*, 2(1), pp.19–37.
- Mackinlay, J. (1986). Automating the design of graphical presentations of relational information. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 5(April 1986), 110–141.
- Mackinlay, J.D., Robertson, G.G. & DeLine, R., 1994. Developing calendar visualizers for the information visualizer. *Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '94*, pp.109–118.
- Mahalingam, A., Kashyap, R. & Mahajan, C., 2010. An evaluation of the applicability of 4D CAD on construction projects. *Automation in Construction*, 19(2), pp.148–159.
- Malcurat, O., 2002. *Spécification d'un environnement logiciel d'assistance au travail collaboratif dans le secteur de l'architecture et du BTP*, Thèse de Doctorat, Nancy-Université.
- March, S.T. & Smith, G.F., 1995. Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), pp.251–266.
- Maria, A., 1997. Introduction to modeling and simulation. In S. Andradóttir et al., eds. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. pp. 7–13.

- Matthews, T., Whittaker, S., Moran, T. & Yuen, S., 2011. Collaboration personas: A new approach to designing workplace collaboration tools. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*. ACM, pp. 2247–2256.
- Mattila, K.G. & Abraham, D.M., 1998. Linear scheduling: past research efforts and future directions. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 5(3), pp.294–303.
- Mazza, R., 2009. *Introduction to Information Visualization*, Springer London.
- McKinney, K., Kim, J., Fischer, M. & Howard, C., 1996. Interactive 4D-CAD. In *Proceedings of the third Congress on Computing in Civil Engineering*. Anaheim, CA, USA, pp. 383–389.
- Mills, K.L., 2003. Computer-Supported Cooperative Work. In *Encyclopedia of Library and Information Sciences*. Marcel Dekker, pp. 666–677.
- Morin, E., 1994. Sur l'interdisciplinarité. *Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études transdisciplinaires n°2*.
- Mouton, C. & Sons, K., 2011. Collaborative visualization: current systems and future trends. *Proceedings of the 16th I3D conference*, pp.101–110.
- Neufert, E., 2002. *Les éléments des projets de construction* Dunod, Paris.
- Norman, D., 2002. *The Design of Everyday Things*, Reprint. B. Books, New York.
- North, C., Conklin, N., Indukuri, K. & Saini, V., 2002. Visualization schemas and a web-based architecture for custom multiple-view visualization of multiple-table databases. *Information Visualization*, 1(3/4), pp.211–228.
- North, C. & Shneiderman, B., 1997. *A Taxonomy of Multiple Window Coordinations*, University of Maryland, College Park, Dept of Computer Science.
- North, C. & Shneiderman, B., 2000. Snap-Together Visualization: Can Users Construct and Operate Coordinated Visualizations? *International Journal of Human-Computer*, pp.715–739.
- OBrien, J.J., 1975. VPM scheduling for high-rise buildings. *Journal of the Construction Division*, 101(4), pp.895–905.
- Ormerod, R.J., 2001. Viewpoint The success and failure of methodologies a comment on Connell (2001): evaluating soft OR. *The Journal of the Operational Research Society*, 52(10), pp.1176–1179.
- Otjacques, B., 2009. *Techniques de visualisation d'information pour l'analyse de situations coopératives*, Thèse de Doctorat, FUNDP Namur.
- Otmane, S., 2009. Réseaux & Travail Collaboratif. Partie I : Travail Collaboratif. Support de Cours.
- Patrick, C., 2003. *Construction project planning and scheduling*, Prentice Hall.
- Penichet, V., Marin, I., Gallud, J., Lozano, M. & Tesoriero, R., 2007. A Classification Method for CSCW Systems. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 168, pp.237–247.

- Perrey, R. & Lycett, M., 2003. Service-oriented architecture. In *Proceedings of Symposium on Applications and the Internet Workshops*. pp. 116–119.
- Philipsen, G., 1994. Effects of six different highlighting modes on visual search performance in menu options. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 6(3), pp.319–335.
- PMI, 2000a. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Philadelphia, PA.
- PMI, 2000b. *Construction Extension to a Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Philadelphia, PA: Project Management Institute.
- Popescu, C.M. & Charoenngam, C., 1995. *Project planning, scheduling, and control in construction. An encyclopedia of terms and applications*, Wiley-Interscience, Ney-York.
- Preece, J., Rogers, Y. & Sharp, H., 2002. *interaction design: beyond human-computer interaction* John Wiley, New York.
- Pries-Heje, J., Baskerville, R. & Venable, J., 2008. Strategies for design science research evaluation. In *ECIS 2008 Proceedings*. pp. 1–12.
- Pruitt, J. & Grudin, J., 2003. Personas: practice and theory. In *Proceedings of the 2003 conference on Designing for user experiences*. pp. 1–15.
- Raje, R.R., Boyles, M. & Fang, S., 1998. CEV: collaborative environment for visualization using Java RMI. *Concurrency: Practice and Experience*, 10(11-13), pp.1079–1085.
- Rantzau, D. & Lang, U., 1998. A scalable virtual environment for large scale scientific data analysis. *Future Generation Computer Systems*, 14(3-4), pp.215–222.
- Rischmoller, L. & Valle, E., 2005. Using 4D in a new “ 2D + time ” Conceptualization. In Raimar et al., eds. *Proceedings of CIB 78 22nd Conference on Information Technology in Construction*. Dresden Germany: Institute for Construction Informatics, pp. 247–251.
- Roberts, J.C., 2007. State of the Art: Coordinated & Multiple Views in Exploratory Visualization. In *Fifth International Conference on Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization (CMV 2007)*. leee, pp. 61–71.
- Russell, A., Staubfrench, S., Tran, N. & Wong, W., 2009. Visualizing high-rise building construction strategies using linear scheduling and 4D CAD. *Automation in Construction*, 18(2), pp.219–236.
- Rußig, V., Deutsch, S. & Spillner, A., 1996. *Branchenbild Bauwirtschaft: Entwicklung und Lage des Baugewerbes sowie Einflussgrößen und Perspektiven der Bautätigkeit in Deutschland*, Duncker & Humblot.
- Sacks, R. & Partouche, R., 2010. Empire State Building Project: Archetype of “Mass Construction”. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(6), pp.702–710.
- Salber, D., Coutaz, J., Decouchant, D. & Riveill, M., 1995. De l’observabilité et de l’honnêteté: le cas du contrôle d’accès dans la Communication Homme-Homme Médiatisée. In *Proceedings IHM’95*. pp. 27–34.

- Sampaio, A., Henriques, P. & Ferreira, P., 2006. Virtual Reality technology applied in Civil Engineering education. In *Proceedings of m-ICTE 2006, IV International Conference on Multimedia and ICT's in Education*. Citeseer, pp. 1351–1355.
- Senior, B.A., 1998. Simplified simulation system for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124, p.72.
- Shah, R., Dawood, N & Castro, S., 2008. Automatic generation of progress profiles for earthwork operations using 4D visualisation model. *International Journal of Information Technology in Construction*, 13, pp.491–506.
- Shedroff, N., 1999. Information Interaction Design: A Unified Field Theory of Design. In R. Jacobson, ed. *Information Design*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 267–291.
- Shenhar, A.J., Levy, O. & Dvir, D., 1997. Mapping the dimensions of project success. *Project Management Journal*, 28(2), pp.5–13.
- Sheppard, L.M., 2004. Virtual building for construction projects. *IEEE computer graphics and applications*, 24(1), pp.6–12.
- Shneiderman, B., 1996. The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations. In *Proceedings IEEE Symposium on Visual Languages*. Boulder, CO, USA: IEEE Computer Society, pp. 336–343.
- Spence, R., 2007. *Information Visualization: Design for Interaction (2nd Edition)*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc.
- Sriprasert, E. & Dawood, Nashwan, 2003. Multi-constraint information management and visualisation for collaborative planning and control in construction. *Virtual Reality*, 8(July), pp.341–366.
- Staub-French, S. & Khanzode, A., 2007. 3D and 4D modeling for design and construction coordination: issues and lessons learned. *ITcon*, vol. 12, pp.381–407.
- Stuart K. Card, Moran, Thomas P. & Newell, A., 1986. *The Psychology of Human-Computer Interaction*, CRC Press.
- Sunke, N., 2009. *Planning of construction projects: a managerial approach*, Thèse de Doctorat, Universitätsbibliothek.
- Tavakoli, A. & Riachi, R., 1990. CPM Use in ENR Top 400 Contractors. *Journal of Management in Engineering*, ASCE, 6(3), pp.282–295.
- Taylor, J. & Robinson, S., 2003. Towards collaborative simulation modelling: Improving human-to-human interaction through groupware. *European Simulation*.
- Telea, A.C., 2000. *Visualisation and Simulation with Object-Oriented Networks*, Thèse de Doctorat, Technische Universiteit Eindhoven.
- Terrin, J.-J., 2009. *Conception collaborative pour innover en architecture, processus, méthodes, outils* L'Harmattan, Paris, France.

- Thabet, W. & Wakefield, R., 1999. Virtual Construction for automated schedule generation. *Technology in Construction: CIB*.
- The KPI Working Group, 2000. *KPI Report for The Minister for Construction*, London.
- Thevenin, D., Calvary, G. & Coutaz, J., 1999. La plasticité en interaction homme-machine. In *Proceedings IHM 99 : Conférence Internationale Francophone en Interaction Homme-Machine*. pp. 2–5.
- Tory, M., Staub-French, S., Huang, D., Chang, Y., Swindells, C. & Pottinger, R., 2013. Comparative visualization of construction schedules. *Automation in Construction*, 29, pp.68–82.
- Tory, M. & Moller, T., 2004. Rethinking visualization: A high-level taxonomy. In *IEEE Symposium on Information Visualization, INFOVIS*. pp. 1–8.
- Tory, M. & Staub-French, S., 2008. Qualitative analysis of visualization: a building design field study. In ACM, ed. *Proceedings of BELIV*. Florence, Italy, pp. 1–8.
- Tufte, E.R., 1990. *Envisioning information*, Graphics Press.
- Tufte, E.R., 2001. *The visual display of quantitative information* 2nd edition, Graphics Press.
- Tufte, E.R. & Weise Moeller, E., 1997. *Visual explanations: images and quantities, evidence and narrative*, Graphics Press Cheshire, CT.
- Tweedie, L., 1997. Characterizing interactive externalizations. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human, 97*, pp.375–382.
- Valiati, E.E.R.A., Pimenta, M.S. & Freitas, C.M.D.S., 2006. A taxonomy of tasks for guiding the evaluation of multidimensional visualizations. In *BELIV '06: Proceedings of the 2006 AVI workshop on BEyond time and errors*. New York, NY, USA: ACM, pp. 1–6.
- Verheij, H. & Augenbroe, G., 2006. Collaborative planning of AEC projects and partnerships. *Automation in Construction*, 15(4), pp.428–437.
- De Vries, B. & Harink, J., 2007. Generation of a construction planning from a 3D CAD model. *Automation in Construction*, 16(1), pp.13–18.
- Waly, A.F. & Thabet, W.Y., 2002. A Virtual Construction Environment for preconstruction planning. *Automation in Construction*, 12, pp.139–154.
- Wang Baldonado, M.Q., Woodruff, A. & Kuchinsky, A., 2000. Guidelines for using multiple views in information visualization. In *AVI'00: Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*. New York, NY, USA: ACM, pp. 110–119.
- Wang, L., Messner, J.I. & Leicht, R., 2007. Assessment of 4D Modeling For Schedule Visualization in Construction Engineering Education. In *24th CIB W78 Conference, Bridging ITC Knowledge to work*. Maribor, Slovenia, pp. 737–742.
- Ware, C., 2004. *Information Visualization: Perception for Design* 2nd edition, San Francisco: Morgan Kaufmann.

- Wehrend, S & Lewis, C., 1990. A problem-oriented classification of visualization techniques. *of the 1st conference on Visualization'90*, pp.139–143.
- Wehrend, Stephen, 1990. A problem-oriented classification of visualization techniques. In *Proceedings of the 1st Conference on Visualization'90*. IEEE Computer Society, pp. 139–143.
- Winch, G.M., 2010. *Managing Construction Projects: an information processing approach* Second Edition, Blackwell Publishing.
- Winckler, M., Palanque, P. & CMDS, 2004. Tasks and scenario-based evaluation of information visualization techniques. *TAMODIA '04 Proceedings of the 3rd annual conference on Task models and diagrams*.
- Wood, J., Wright, H. & Brodlie, K., 1995. CSCV - Computer Supported Collaborative Visualization. In *International Conference on Visualization and Modelling*. Leeds.
- Xue, X., Wang, Y., Shen, Q. & Yu, X., 2007. Coordination mechanisms for construction supply chain management in the Internet environment. *International Journal of Project Management*, 25(2), pp.150–157.
- Yabuki, N. & Shitani, T., 2005. A Management System for Cut and Fill Earthworks Based on 4D CAD and EVMS. In *Proceedings of Computing in Civil Engineering conference*.
- Yarosh, S., Matthews, T., Moran, T.P. & Smith, B., 2010. Collaboration personas: A framework for understanding & designing collaborative workplace tools. In *Workshop on Collective Intelligence in Organizations, ACM CSCW*. pp. 582–595.
- Zhang, J., Yu, F., Li, D. & Hu, Z., 2012. Development and Implementation of an Industry Foundation Classes-Based Graphic Information Model for Virtual Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 00, pp.1–15.
- Zhou, W., Georgakis, P., Heesom, D. & Feng, X., 2012. A model-based groupware solution for distributed real-time collaborative 4D planning via teamwork. *Journal of Computing in Civil Engineering*.
- Zhou, W., 2009. *An Investigation into a Distributed Virtual Reality Environment for Real-Time Collaborative 4D Construction Planning and Simulation*, Thèse de Doctorat, University of Wolverhampton.
- Zhou, W., Heesom, D., Georgakis, P., Nwagboso, C. & Feng, A., 2009. An interactive approach to collaborative 4d construction planning. *Journal of Information Technology*, 14(March), pp.30–47.
- Zignale, D., Kubicki, S., Ramel, S. & Halin, G., 2011. A model-based method for the design of services in collaborative business environments. In *Proceedings of IESS 1.1: Second International Conference on Exploring Services Sciences*. Geneva, Switzerland, pp. 68–82.

Glossaire

- Activité :** C'est un « ensemble de tâches qui consomment du temps et des ressources, et dont l'exécution est nécessaire pour obtenir ou contribuer à la réalisation d'un ou de plusieurs résultats » (AFITEP-AFNOR 2010). Une activité se caractérise par une date de démarrage, une durée d'exécution, une date de fin et une consommation de ressources pouvant être matérielles humaines ou financières.
- Cartographie visuelle :** La cartographie visuelle consiste à définir les structures visuelles correspondant aux données à représenter visuellement. Selon Mazza (2009), les trois structures à définir sont le substrat spatial, les éléments graphiques et les propriétés graphiques.
- Chemin critique :** C'est le « chemin du réseau d'un projet (le plus long) constitué d'un enchaînement de tâches dites critiques, dont la somme des durées représente la durée totale incompressible du projet. [...] Tout retard pris sur une des tâches le constituant se répercute intégralement sur la date d'achèvement du projet.» (AFITEP-AFNOR 2010). Selon Popescu et Charoenngam (Popescu & Charoenngam 1995), il y a chemin critique lorsque l'un des trois événements se produit :
- La date de fin au plus tard du projet équivaut à la date de fin au plus tôt. Dans ce cas, le chemin critique est le chemin sur lequel toutes les activités ont une marge nulle ;
 - La date de fin au plus tard du projet est définie plus tard que la date de fin au plus tôt. Dans ce cas, le chemin critique sera la chaîne des activités avec le moins de marge totale positive ;
 - La date de fin au plus tard du projet est définie plus tôt que la date de fin au plus tôt. Dans ce cas, le chemin critique est la chaîne d'activités avec le maximum de marge totale négative.
- Collecticiels :** Systèmes informatiques qui assistent des groupes de personnes engagées dans une tâche commune (ou un but commun) et qui fournissent une interface vers un environnement partagé (Ellis et al. 1991). Pour Mills (2003), la famille des collecticiels inclut les programmes de partage, les logiciels de vidéoconférence, les logiciels de suivi de changement dans un document, les outils de messagerie électronique, et les logiciels d'assistance au visionnage collaboratif de pages Web.

Contrainte :	Une contrainte est définie comme étant une condition imposée affectant le démarrage ou la réalisation d'une activité de projet (Popescu & Charoenngam 1995). Les contraintes peuvent être technologiques, managériales ou simplement externes. Pour l'ordonnancement des activités d'un projet, on distingue généralement les contraintes de localisation temporelle et les contraintes d'antériorité. La première catégorie s'applique à des situations dans lesquelles une activité ne peut démarrer avant une certaine date (du fait de facteurs comme l'étude préalable, la commande de matériel, etc.) ou d'activités devant être réalisées forcément une date donnée. Quant aux contraintes d'antériorité, elles traduisent le fait que certaines activités doivent être réalisées impérativement dans un ordre donné. C'est notamment le cas lorsqu'une activité ne peut pas démarrer avant qu'une autre ne soit achevée.
Éléments graphiques :	Les éléments graphiques sont tous les éléments visibles dans l'espace de création de représentation visuelle. Quatre types d'éléments visuels sont généralement utilisés : les points, les lignes, les surfaces et les volumes.
Extrant :	Un extrant est un « élément ou une donnée qui résulte de l'exécution d'une tâche, d'un lot de travail ou d'un processus. Quand il est physiquement matérialisé par un document ou un matériel, il est souvent appelé livrable » (AFITEP-AFNOR 2010).
Fonctions managériales :	Les fonctions managériales correspondent aux fonctions de gestion d'une organisation. On en distingue généralement cinq à savoir la planification, l'organisation, la gestion du personnel, le leadership et le contrôle (Harold Koontz 1980).
Interaction (technique d') :	Les techniques d'interaction permettent de donner la possibilité à l'utilisateur de naviguer à travers la vue et de manipuler les données de manière à faire correspondre le contenu de la vue à la tâche de visualisation qu'il réalise. En visualisation, trois catégories de techniques d'interaction sont souvent utilisées pour la manipulation des vues : le <i>scrolling</i> , l' <i>overview + details</i> , et le <i>focus + context</i> . Deux autres concepts sont importants pour définir la notion d'interaction. Il s'agit du niveau d'interactivité (manuelle, mécanisée, enseignable, guidable, ou automatique) et du mode d'interaction (continue, par étapes, passive, ou composite).
Jalon :	En gestion de projet, un jalon marque la fin d'une étape, mais peut aussi désigner un événement important dans l'atteinte des objectifs du projet. Un tel événement peut être ou non dans le chemin critique du projet et il est courant, en ordonnancement des activités, de représenter le jalon par une activité de durée nulle.
Livrable :	Selon l'AFNOR, un livrable est un « résultat, vérifiable et/ou mesurable, qui doit être produit et validé au cours et/ou à la fin du projet, nécessaire à la poursuite ou à l'achèvement du projet. [...] Les livrables peuvent être des équipements, des documents (plan, réquisitions, dossier d'ingénierie, etc.), des prestations (formations, assistance, etc.), par exemple » (AFITEP-AFNOR 2010).
Marge d'une tâche :	La marge d'une tâche est la période de temps pendant laquelle elle « peut glisser sans affecter les dates d'une autre tâche (successeur ou prédécesseur) ou la date de fin du projet » (AFITEP-AFNOR 2010). On distingue la marge libre (temps entre la fin d'une activité et le début de l'activité suivante) et la marge totale (différence entre la date de fin au plus tard et date de fin au plus tôt).
Objectif du projet :	C'est le « but à atteindre, exprimé en termes mesurables et quantifiés. [...] L'atteinte de l'ensemble des objectifs correspond à l'exécution complète du projet et à sa réussite. [...] Les objectifs d'un projet se déclinent en objectifs de coûts, de délais, de performances techniques, de risques, etc., en vue de satisfaire le client » (AFITEP-AFNOR 2010).

Ordonnancement :	L'ordonnancement est une notion de gestion opérationnelle du projet consistant à attribuer une date de début et une date de fin à chaque activité du projet. Il intervient à la fin de la planification lorsque les activités et les relations et interrelations entre elles ont été identifiées.
Personas de collaboration :	Les <i>personas de collaboration</i> sont des descriptions empiriquement dérivées de groupes fictifs de personnes ayant des qualités, des buts et des besoins spécifiques, réalisés en collaborant les uns avec les autres. Les personas de collaboration peuvent être utilisés pour aider les utilisateurs dans le choix d'outils de collaboration appropriés ; et concevoir de nouveaux outils de collaboration correspondant mieux aux besoins de groupes typiques (Yarosh et al. 2010).
Planification :	La planification est l'établissement des activités et événements du projet, leurs relations et interrelations, et les séquences dans lesquelles les activités doivent être réalisées ainsi que les ressources nécessaires à la réalisation (Popescu & Charoenngam 1995). De manière plus large, il s'agit d'un « processus de décision effectué à l'avance de l'action qui s'efforce de concevoir un futur désiré et les moyens efficaces pour y parvenir » ((Ackoff 1970) cité par (Alexander Laufer & R. Tucker 1987)). Pour planifier, l'on commence par identifier les activités à réaliser ainsi que les relations entre elles, à travers une structure de découpage du projet (WBS). Après quoi, il faut estimer pour chaque activité la durée et les ressources nécessaires et procéder à l'ordonnancement des activités.
Planning :	Résultat d'une démarche de planification et d'ordonnancement, le planning est un document représentant, dans le temps (et parfois dans l'espace), les activités à réaliser et les liens entre elles. Il s'agit donc d'une « représentation (graphique ou non) faisant apparaître les dates des événements significatifs d'un projet ou d'une partie d'un projet » (AFITEP-AFNOR 2010).
Propriétés graphiques :	Les propriétés graphiques (encore appelées variables rétinienne) sont les propriétés des éléments graphiques auxquelles la rétine de l'œil humain est très sensible. Bertin (1967) identifie six grandes classes de variables rétinienne : la couleur, le grain, la valeur, la taille, la forme, et l'orientation.
Propriétés préattentives :	Les propriétés préattentives sont les propriétés graphiques immédiatement détectées par le système visuel, avant même que l'utilisateur ne concentre son attention sur l'image pour déterminer la présence ou l'absence d'éléments avec la propriété donnée. Les propriétés préattentives les plus couramment utilisées sont la couleur, la forme, le mouvement, et la position. Notons que l'utilisation efficace de propriétés visuelles préattentives répond à des règles précises.
Ressources :	On entend par ressources les consommables nécessaires à la réalisation d'une tâche. Le temps n'est pas considéré comme étant une ressource. Les ressources ont un coût d'utilisation et un taux de disponibilité et peuvent être humaines, matérielles, logicielles ou financières. On parle de ressource type pour désigner une ressource d'ordre générique comme un profil de personne, un type de matériel. Lorsque la ressource est identifiée (personne, matériel numéroté, etc.), on parle de ressource nominative (AFITEP-AFNOR 2010).
Structure de Décomposition du Produit (PBS [Product Breakdown Structure]) :	Encore appelée Organigramme Produit, la PBS est un « outil de structuration permettant d'identifier, de manière arborescente et exhaustive, l'ensemble des composants du produit d'un projet » (AFITEP-AFNOR 2010). Il s'agit d'une forme de modélisation d'un produit qui affiche, sous forme d'organigramme ou de tableau, sa structure de décomposition. Il peut représenter sa nomenclature ou l'enchaînement des produits qui entrent dans sa composition.

Structure de Découpage du Projet (WBS [Work Breakdown Structure]) :	La Structure de Découpage du Projet, encore désignée par l'AFNOR comme la structure de décomposition du projet en tâches est un « outil de structuration permettant d'identifier, de manière arborescente et exhaustive, l'ensemble des tâches d'un projet qui sont traitées en gestion de projet par l'équipe de projet, afin de maîtriser les coûts, délais et performances du projet » (AFITEP-AFNOR 2010). Encore appelé organigramme des tâches, il découpe le projet en phases et activités de manière à structurer les réalisations intermédiaires et les livrables. À cet effet, l'AFNOR (2010) précise que « cette décomposition du projet peut être faite également en sous-projets, en lots de travail, en livrables ou en tâches ».
Substrat spatial :	Le substrat spatial, qui peut être décrit en termes d'axes, définit les dimensions dans l'espace physique où la représentation visuelle est créée. Dans un espace cartésien par exemple, les abscisses (x) et les ordonnées (y) correspondent au substrat spatial et chacun de ces axes peut avoir un type différent, en fonction du type (quantitatif, ordinal, nominal) de données à représenter.
Tâche critique :	Il s'agit de la « tâche dont la marge totale est nulle et située sur un chemin critique dans l'échéancier du projet. Elle est dite critique parce qu'on ne dispose d'aucun degré de liberté dans son ordonnancement et que tout retard pris conduit à un retard correspondant sur la date de fin du projet » (AFITEP-AFNOR 2010).
Tâche :	Selon l'AFNOR, une tâche est un « ensemble d'opérations dont l'exécution est nécessaire pour obtenir un ou plusieurs livrables » (AFITEP-AFNOR 2010).
Trèfle fonctionnel :	Le trèfle fonctionnel est l'une des classifications les plus couramment utilisées pour regrouper les systèmes de TCAO. Il présente trois espaces représentant les fonctionnalités typiques des collecticiels : la production, la coordination et la communication.
Visualisation :	Activité cognitive faisant appel à des représentations visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation mentale de l'objet représenté (Mazza 2009). Visualiser revient donc, en partie, à former un modèle mental ou une image mentale d'une chose ; ce qui, selon Spence, est une activité purement cognitive qui n'a rien à voir avec l'ordinateur (Spence 2007).
Visualisation collaborative :	La visualisation collaborative est l'utilisation partagée de représentations visuelles (interactives) assistées par ordinateur de données par plus d'une personne dans le but commun de contribuer à des activités conjointes de traitement d'information (Isenberg et al. 2011). Le domaine scientifique de la visualisation collaborative se rapporte presque essentiellement à l'utilisation partagée de représentations visuelles.
Vue :	Les vues sont le fruit du mappage des structures de données avec les structures visuelles et de la génération de représentations visuelles dans un espace physique qui peut être représenté par l'ordinateur. Il s'agit donc, selon Wang Baldonado et al. (2000), d'un ensemble de données avec une spécification de la façon d'afficher visuellement ces données, sous forme textuelle ou graphique. Pour la création de représentations visuelles efficaces, Mazza (2009) propose cinq questionnements importants qui sont : le problème, la nature des données, le nombre de dimensions, la structure des données, et le type d'interaction.
Vue métier :	Kubicki et al. (2007) définissent les vues métiers comme étant les vues que les professionnels du secteur manipulent dans leur travail de tous les jours. Dans le secteur de la construction par exemple, il est très courant d'avoir recours à un diagramme de Gantt pour représenter le planning ou à un réseau PERT pour mettre en évidence le chemin critique. La particularité d'une vue métier, par rapport à tout autre type de vue réside, dans le lien intrinsèque que la représentation entretient avec le

besoin métier de son utilisateur. Il s'agit donc dans la plupart des cas de techniques de représentation liées à des besoins métiers particuliers et véhiculant des informations très précises.

Vues multiples :

Un système de vues multiples utilise deux ou plusieurs vues uniques distinctes pour afficher des portions similaires ou différentes de l'information, de manière à permettre l'investigation d'une entité conceptuelle donnée (Wang Baldonado et *al.* 2000). Ces vues peuvent être étroitement coordonnées de sorte que l'interaction sur des composantes d'une vue se propage vers les composantes correspondantes dans les autres vues (North et *al.* 2002). On parle dans ce cas de vues multiples coordonnées.

Index des termes

A

Animation 4D, 72, 73
Aspect collaboratif de la planification, 49
Assemblage manuel, 183, 184, 187

B

BIM, 71, 73

C

Cartographie visuelle, 116
Catégories de projets de construction, 33
Chaîne de production, 32, 33, 35, 65, 81
Chemin critique, 30, 53, 56, 57, 58, 59, 88, 283, 284, 286
Conflits spatio-temporels, 77, 176
Constructibilité, 43, 50, 63, 76, 78, 79, 176, 181
construction virtuelle, 77, 185
Contexte de l'acteur, 179
Contexte de l'activité, 179, 198
Contexte de l'utilisateur, 179
Corps de métier, 32, 52
CPM, 46, 56, 57, 184
Cycle de vie, 31, 32

D

Diagrammes à barres, 52, 54
Diagrammes *activité-sur-flèche*, 53, 55
Diagrammes *activité-sur-nœud*, 53, 54
Diagrammes de séquence, 53
Dilemme, 46, 48, 50

E

Esthétique, 87, 126, 140

F

Facteurs de succès, 27, 37, 39, 40, 65
Formats de planning, 52
Forme, 118

G

Diagramme de Gantt, 46, 52, 87, 88, 91, 93, 94, 286
Géovisualisation, 110
Grain, 117
Graphe potentiel-étapes, 54

I

IFC, 71, 73, 82
Indicateurs clés de performance, 38
Indicateurs de succès, 38, 39
Intégrité graphique, 126, 140
Interdépendance, 36, 43, 50
Interopérabilité, 71, 73

L

Last Planner System, 62
Liaison manuelle, 183, 187
Line of Balance (LOB), 59, 60, 61
Linear Scheduling Method, 59
LSM, 59, 60

M

Méthode de la chaîne critique, 63
Méthode des diagrammes de priorité, 54
Méthode PERT, 56, 57
Modélisation intégrée, 184
Multiplicité, 36, 42, 48, 49, 65

N

Nature des données, 123, 140

O

Optimisation, 34, 43, 49, 131
Orientation, 112, 118

P

Perception, 110, 111, 112, 113
Principes de Gestalt, 112
Propriétés préattentives, 118, 119, 140

R

Ratio données–encre, 126
Réalité Virtuelle, 63
Règle de l'évidence, 132, 133
Règle de l'optimisation, 131
Règle de la cohérence, 133
Règle de la complémentarité, 129
Règle de la décomposition, 129

Règle de la diversité, 128
Règle de la gestion de l'attention, 133
Règle de la parcimonie, 130
Représentations visuelles, 113, 114, 286
Réseaux temporels, 54

S

Science de la conception, 98, 99, 101, 102
Simulation collaborative, 4D/nD, 87, 88, 95, 180, 183,

T

Taille, 117
Techniques d'interaction, 124, 206

U

UML, 138

V

Valeur, 117
Visualisation de l'Information, 109, 110
Visualisation Scientifique, 110
Vues métiers, 87, 88, 191
Vues multiples coordonnées, 109, 127, 134, 135, 136,
141

W

WBS, 46, 51, 184, 285, 286

Table des illustrations

Liste des Figures

Figure 1 : Principales notions d'un projet	29
Figure 2 : Principales étapes d'un projet de construction	31
Figure 3 : Configuration typique d'une chaîne de production dans le secteur de la construction [adapté de (Sunke 2009)]	32
Figure 4 : Structure générale de la chaîne de production d'une construction [adaptée de (Xue et al. 2007)]	33
Figure 5 : Segments du secteur de la construction [adaptée de (Sunke 2009)]	34
Figure 6 : La matrice des problèmes de Xue et al. (Xue et al. 2007)	36
Figure 7 : Indicateurs clés de performance pour le succès d'un projet de construction [adapté de (Chan & Chan 2004)]	39
Figure 8 : Cadre conceptuel pour les facteurs affectant le succès d'un projet de construction [adapté de (Chan et al. 2004)]	40
Figure 9 : Modèle hiérarchique pour le succès des projets de construction [adapté de (Chua & Kog 1999)]	41
Figure 10 : Le processus de planification [adapté de (Laufer & Tucker 1987)]	43
Figure 11 : Différents processus de planification [adapté de (PMI 2000a)]	45
Figure 12 : Compétences de planification du gestionnaire et du spécialiste de planification de l'équipe [adapté de (Laufer & Tucker 1988)]	47
Figure 13 : Effets du <i>timing</i> de la planification [adapté de (Laufer & Tucker 1988)]	48
Figure 14 : Planification stratégique, tactique et opérationnelle d'un projet de construction [adapté de (Verheij & Augenbroe 2006)]	52
Figure 15 : Exemple de diagramme à barres	53
Figure 16 : Diagramme de séquence <i>activité-sur-flèche</i> [adapté de (Patrick 2003)]	54
Figure 17 : Diagramme de séquence <i>activité-sur-nœud</i> [adapté de (Patrick, 2003)]	54
Figure 18 : Réseau temporel – format à barres [adapté de (Patrick 2003)]	55
Figure 19 : Réseau temporel – format <i>activité-sur-flèche</i> [adapté de (Patrick, 2003)]	55
Figure 20 : Système PERT des trois différentes estimations [adapté de (Popescu & Charoengam 1995)]	58
Figure 21 : Description d'une activité pour la construction d'un réseau PERT	58
Figure 22 : Exemple de réseau PERT (le chemin critique est en rouge)	59
Figure 23 : Un exemple type de LSM [adapté de (Mattila & Abraham 1998)]	60
Figure 24 : Exemple de planification avec la méthode LOB : (a) Réseau unitaire (planning de production) ; (b) Diagramme des objectifs (cumulés) ; (c) Diagramme d'avancement [adapté de (Mattila & Abraham 1998)]	61
Figure 25 : Séance de planification avec la méthode du Last Planner System	62
Figure 26 : Différentes interprétations de la même représentation 2D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]	70
Figure 27 : Communication basée sur un modèle 3D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]	71
Figure 28 : Séquence de construction [adapté de (Collier & M. Fischer 1995)]	72

Figure 29 : Composantes d'une simulation 4D [adapté de (McKinney et al. 1996)]	72
Figure 30 : Planification de la construction avec un modèle 4D [adapté de (Collier & Fischer 1995)]	74
Figure 31 : Processus de communication et de génération d'information pour l'analyse de constructibilité basée sur des modèles 3D/4D [adapté de (Hartmann & Fischer 2007)]	79
Figure 32 : Copie d'écran de l'interface de Navisworks [Source : asti.com]	81
Figure 33 : Copie d'écran de l'interface de Synchro Professional [Source : synchrold.com]	82
Figure 34 : Copie d'écran de l'interface de la plateforme 5D de Vico [Source : vicosoftware.com]	82
Figure 35 : Capture d'écran de l'interface SketchUp intégrant le plug-in XD Builder [Source : 4dvirtualbuilder.com]	83
Figure 36 : Exemple d'utilisation de la surbrillance pour répondre à la question « quand accéder à la zone C ? » (Liston & Fischer 2000)	91
Figure 37 : Exemple de superpositions pour répondre à la question « quand accéder à la zone C » (Liston & Fischer 2000)	92
Figure 38 : Esquisse d'une partie du tableau digital de planification (Rischnoller & Valle 2005)	93
Figure 39 : Utilisation de la planification linéaire dans une simulation 4D [adapté de (Russell et al. 2009)]	94
Figure 40 : Résumé de notre démarche de recherche	101
Figure 41 : Cadre stratégique pour l'évaluation d'une recherche en science de la conception (Pries-Heje et al. 2008)	102
Figure 42 : Le continuum de la compréhension, selon Shedroff [Traduit de (Mazza 2009)]	110
Figure 43 : Le processus de visualisation de l'information [Traduit de (Spence 2007)]	111
Figure 44 : Exemples du principe de proximité (Mazza 2009)	112
Figure 45 : Exemple du principe de similarité (Mazza 2009)	112
Figure 46 : Exemple du principe de fermeture (Mazza 2009)	113
Figure 47 : Le processus de génération d'une représentation graphique [Traduit de (Mazza 2009)]	114
Figure 48 : Exemples d'éléments graphiques (Mazza 2009)	117
Figure 49 : Quelques exemples de propriétés graphiques (Mazza 2009)	118
Figure 50 : Exemple de détection de cible (Healey 1992)	119
Figure 51 : Exemple de détection de contours (Healey 1992)	119
Figure 52 : Exemple montrant que la teinte et l'intensité de la couleur sont traitées de manière préattentive (Mazza 2009)	120
Figure 53 : Attributs préattentifs de la forme (Mazza 2009)	122
Figure 54 : Taxonomie des tâches de visualisation de Valiati et al. (Valiati et al. 2006)	125
Figure 55 : Exemple de vues complémentaires dans une simulation 4D	129
Figure 56 : Exemple de décomposition de vues (Wang Baldonado et al. 2000)	130
Figure 57 : Taxonomie 2X3 pour la coordination des fenêtres multiples de North et Shneiderman (North & Shneiderman 1997)	137
Figure 58 : Modèle abstrait de coordination en visualisation exploratoire de Boukhelifa et Rodgers (Boukhelifa & Rodgers 2003)	138
Figure 59 : Prototype CViews montrant plusieurs vues coordonnées (Boukhelifa & Rodgers 2003)	139
Figure 60 : Modèle conceptuel de la coordination des vues dans le prototype CViews (Boukhelifa & Rodgers 2003)	139
Figure 61 : Le trèfle fonctionnel du collecticiel (Salber et al. 1995)	149
Figure 62 : La version du trèfle fonctionnel proposée par David (David 2001)	150
Figure 63 : Matrice de classification des groupes de DeSanctis et Gallupe [adapté de (DeSanctis & Gallupe 1987)]	151
Figure 64 : Catégorisation des approches suivant la dispersion spatio-temporelle des participants [adapté de (Johansen 1988)]	152
Figure 65 : Extraits d'un exemple de persona de collaboration [adapté de (Tara Matthews et al. 2011)]	157
Figure 66 : Liste des qualités des collaborations [adapté de (Yarosh et al. 2010)]	158
Figure 67 : Situations de visualisation collaborative suivant la matrice spatio-temporelle [adapté de (Isenberg et al. 2011)]	162
Figure 68 : Le pipeline de visualisation de Haber et McNabb tel que synthétisé par Wood et al. (Wood et al. 1995)	163
Figure 69 : Version étendue du modèle de Habber et McNabb, proposée par Wood et al. pour la visualisation collaborative (Wood et al. 1995)	164
Figure 70 : Les utilisateurs A et B visionnent la même donnée de différentes façons (Wood et al. 1995)	164
Figure 71 : Les utilisateurs A et B synchronisent leurs vues (Wood et al. 1995)	164
Figure 72 : Les utilisateurs A et B collaborent à l'étape de la cartographie visuelle (données publiques) (Wood et al. 1995)	165
Figure 73 : Les utilisateurs A et B collaborent à l'étape de la cartographie visuelle, mais les données filtrées demeurent privées à A (Wood et al. 1995)	165

Figure 74 : Vue schématique d'une étude de simulation [adapté de (Maria 1997)]	174
Figure 75 : Les étapes correspondant aux différentes phases d'une simulation	176
Figure 76 : Les mécanismes de coordination et leurs liens avec les typologies organisationnelles (Kubicki 2006)	179
Figure 77 : Les trois contextes considérés par Kubicki (2006)	180
Figure 78 : principales composantes de la simulation collaborative 4D/nD de la construction	183
Figure 79 : L'iRoom du CIFE (Garcia et al. 2004)	185
Figure 80 : L'Interface Virtuelle Interactive de Waly and Thabet (2002)	186
Figure 81 : Workflow de collaboration interactive proposé par Zhou et al. (2009)	187
Figure 82 : Positionnement des outils utilisés lors d'une opération de construction (Guerriero 2009)	189
Figure 83 : Exemple de liaison d'éléments de vues différents dans une simulation nD de la construction (Kubicki 2006)	192
Figure 84 : Exemple de liaison hiérarchique d'éléments de vues différents dans une simulation nD (Kubicki 2006)	193
Figure 85 : Exemple de liaison « libre » d'éléments de vues différents dans une simulation nD (Kubicki 2006)	193
Figure 86 : Positionnement de nos objectifs par rapport aux trois contextes de l'activité collective	199
Figure 87 : Principales étapes de la méthode proposée	202
Figure 88 : Première étape : description de la situation collaborative	204
Figure 89 : Deuxième étape : identification des besoins de visualisation	205
Figure 90 : Troisième étape : choix des vues métiers adaptées	206
Figure 91 : Quatrième étape : composition de vues multiples coordonnées	207
Figure 92 : l'architecture du Meta-Object Facility (MOF)	208
Figure 93 : Métamodèle de situation collaborative	211
Figure 94 : Métamodèle de tâches de visualisation	215
Figure 95 : Métamodèle de vue métier	219
Figure 96 : Métamodèle de vues multiples coordonnées nD	223
Figure 97 : Positionnement des métamodèles dans la méthode	227
Figure 98 : Liens entre les métamodèles de la méthode	228
Figure 99 : Aperçu d'un des blocs de maisons projetés	234
Figure 100: Principales étapes préliminaires nécessaires pour l'étude de cas	235
Figure 101 : Maquette de la vue proposée au superviseur (niveau M0)	247
Figure 102 : Maquette de la vue proposée au sous-traitant en charpente	249
Figure 103 : Maquette de la vue proposée au sous-traitant en isolation	251
Figure 104 : Connaissance et utilisation des techniques de planification	254
Figure 105 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les maîtres d'ouvrage	254
Figure 106 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les maîtres d'œuvre	255
Figure 107 : Connaissance et utilisation des techniques de planification par les entreprises	255
Figure 108 : Pertinence des besoins identifiés pour le superviseur	256
Figure 109 : Pertinence des besoins identifiés pour l'entreprise A	257
Figure 110 : Pertinence des besoins identifiés pour l'entreprise B	257
Figure 111 : Pertinence de la vue proposée au superviseur	258
Figure 112 : Pertinence de la vue proposée à l'entreprise A	259
Figure 113 : Pertinence de la vue proposée à l'entreprise B	260

Liste des tableaux

Tableau 1 : Représentations utilisées pour le planning en phase pré-construction [adapté de (Laufer et al. 1994)]	46
Tableau 2 : Participants clés à la planification de la construction [adapté de (Laufer et al. 1994)]	51
Tableau 3 : Résumé des principales méthodes de planification de la construction	64
Tableau 4 : Exigences fondamentales pour les applications de simulation 4D [adapté de (Heesom & Mahdjoubi 2004)]	76
Tableau 5 : Taxonomie des conflits spatio-temporels entre deux activités [adapté de (Akinci et al. 2000)]	78
Tableau 6 : Techniques d'implication de l'utilisateur dans la conception [adapté de (Preece et al. 2002)]	97
Tableau 7 : Attributs préattentifs de la forme [Traduit de (Mazza 2009)]	121
Tableau 8 : Les dix dimensions clés des systèmes de TCAO (adapté de [Mills 2003])	147
Tableau 9 : Classification spatio-temporelle de Grudin [adapté de (Grudin 1994)]	153

Tableau 10 : Possibilités spatio-temporelles (Penichet et <i>al.</i> 2007)	154
Tableau 11 : Possibilités en fonction des caractéristiques du TCAO (Penichet et <i>al.</i> 2007)	154
Tableau 12 : Classification non exclusive proposée par Penichet et <i>al.</i> (Penichet et <i>al.</i> 2007)	155
Tableau 13 : Les types de collaboration et leurs dimensions distinctives (Matthews et <i>al.</i> 2011)	159
Tableau 14 : Différents rôles dans une étude de simulation collaborative	182
Tableau 15 : Critères et propriétés considérés pour le calcul du score d'adaptation As	226
Tableau 16 : Acteurs impliqués dans la simulation	236
Tableau 17 : Description de la situation collaborative	237
Tableau 18 : Pratiques individuelles liées aux différents rôles et acteurs responsables	238
Tableau 19 : Besoins d'information et contextes physiques	239
Tableau 20 : Représentations visuelles possibles des besoins d'information	240
Tableau 21 : Description des vues métiers	242
Tableau 22 : Calcul du score As pour différentes représentations visuelles de l'ouvrage, par rapport au besoin d'identification des conflits du superviseur	243
Tableau 23 : Calcul du score As pour différentes représentations visuelles de l'ouvrage, par rapport au besoin de vérification des activités répétitives d'isolation	244
Tableau 24 : Synthèse des vues métiers sélectionnées pour chaque acteur	245
Tableau 25 : Description de la vue proposée au superviseur (niveau M1)	246
Tableau 26 : Description de la vue proposée au sous-traitant en charpente	248
Tableau 27 : Description de la vue proposée au sous-traitant en isolation	250
Tableau 28 : Types et nombre de professionnels ayant participé à l'enquête	253

Documents annexes

Contenu :

Annexe 1 : Guide d'entretien sur les pratiques de planification

Annexe 2 : Questionnaire sur la pertinence et l'intérêt des vues proposées

Documents annexes

Annexe 1 : Guide d'entretien « Compréhension des pratiques de planification »

IDENTIFICATION DES PRATIQUES LIEES A LA PREPARATION DE CHANTIER

Guide d'entretien n°001

Introduction :

Ce guide d'entretien entre dans le cadre du travail de Conrad Boton visant à étudier les pratiques collaboratives en matière de préparation de chantier, et plus particulièrement la simulation de la construction. Un document annexe explique mieux l'objectif des travaux et leur contexte.

Le but de l'entretien est d'identifier les pratiques des acteurs en fonction de l'envergure du projet et de recenser les différents acteurs impliqués, leurs rôles ainsi que l'utilisation des outils informatiques pour gérer cette phase.

En fonction des résultats obtenus, d'autres questionnaires pourraient être élaborés pour approfondir certains aspects particuliers.

Fonction :

Entité :

L'interviewé a-t-il déjà participé à une préparation de chantier : Oui Non

Date de l'interview :

Lieu de l'interview :

Durée de l'interview :

I- AVIS GLOBAL SUR LA PREPARATION DE CHANTIER

1. A votre avis, la préparation de chantier est :

Indispensable Utile mais pas indispensable pas vraiment utile

2. Quelle est (ou devrait être) son utilité dans un projet ?

.....
.....
.....

II- CONTEXTE D'UNE PREPARATION DE CHANTIER

3. Quelles sont les pratiques entrant dans le cadre d'une préparation de chantier ? (Pratiques, acteurs, envergure du projet (coût, nombre d'acteurs, complexité))

.....
.....
.....
.....

4. Pour chaque pratique, quels sont les documents nécessaires ?

.....
.....
.....
.....
.....

5. Les réservations : qui les fournit ? Comment sont-elles présentées ?

.....
.....
.....
.....
.....

6. Le planning : qui l'élabore ? Comment se présente-t-il ?

.....
.....
.....
.....
.....

**7. Organisation du chantier : Quels acteurs/documents sont concernés ?
Comment s'organise-ton ?**

.....
.....
.....
.....
.....

**8. A votre avis, la phase de préparation de chantier permet-elle d'anticiper
tous les aspects de l'exécution ? Est-il possible (ou adéquat) de tout
anticiper ?**

.....
.....
.....
.....
.....

III- UTILISATION D'OUTILS INFORMATIQUES

9. Vos outils informatiques actuels vous aident-ils à gérer cette phase ?

Oui Non

10. Si oui, sur quel(s) aspect(s) ?

.....
.....
.....
.....

11. Quel devrait être le meilleur apport de l'informatique pour gérer cette phase ? (Services de collaboration, outils de planification collaborative, outils de CAO, etc.)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

12. Quels outils utilisez-vous pour les tâches suivantes ?

TACHES	VUES
Elaboration du planning d'exécution	
Elaboration de la liste de diffusion des entreprises	
Elaboration du règlement intérieur	
Tracé du plan d'installation	
Tracé du plan d'exécution	
Examen de cohérence et visa	
Elaboration de la déclaration d'ouverture de chantier	
Etablissement de la demande pour occupation du domaine public	
Consultation des services pour raccordement VRD	
Demande de permis de démolir	
Ouverture des registres (<i>registre des mises en demeure, registre unique du personnel et registre unique d'hygiène et de santé</i>)	
Etablissement de l'état des lieux préables	

13. Y a-t-il des aspects liés à la préparation de chantier non pris en compte par ce questionnaire ?

Oui Non

14. Si oui, lesquels ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe 2 : Questionnaire « Pertinence et intérêt des vues proposées »

Evaluation de techniques de représentation du planning



0% 100%

Français

Informations personnelles

Nom et prénom :

 Facultatif

* Informations

Cette question est obligatoire.
Veillez compléter toutes les parties.

E-mail :

Organisme :

Rôle (architecte, ingénieur stabilité, Maître d'Ouvrage, Conducteur de travaux, ...) :

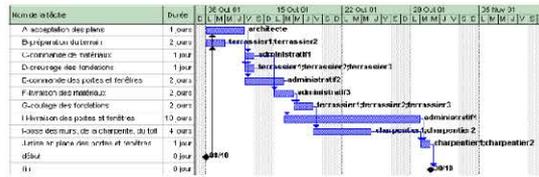
created by [CRP Henri Tudor](#) powered by [LimeSurvey](#)

Français

Introduction : Quelques techniques de représentation

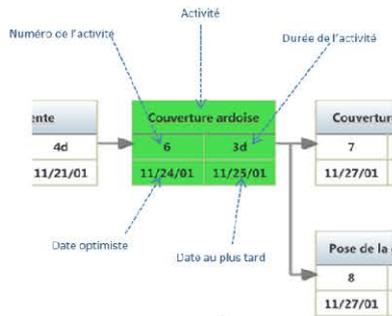
Voici 3 techniques de représentation du planning, utilisées dans le secteur de la construction :

1. Le diagramme de Gantt



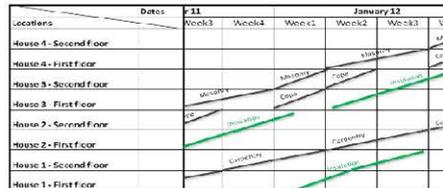
Le diagramme de Gantt représente les activités sous forme de barres dont les longueurs sont proportionnelles à la durée des activités représentées.

2. Le réseau PERT



Un réseau PERT permet de représenter les contraintes d'enchaînement entre les différentes activités à réaliser, de manière à faire ressortir le chemin critique.

3. La planification chemin de fer



La planification chemin de fer est une représentation spatio-temporelle d'une planification. Elle est utilisée en gestion de projet lorsque la localisation des tâches est importante dans la planification. Cette représentation est particulièrement adaptée pour planifier des projets dont les tâches sont répétitives (par exemple, une série d'étages identiques) ou s'effectuant le long d'un parcours linéaire (d'où l'appellation chemin de fer).

Laquelle ou lesquelles de ces techniques connaissez-vous ?

Cocher la ou les réponses

- Le diagramme de Gantt
- Le réseau PERT
- Le planning chemin de fer

Laquelle ou lesquelles de ces techniques avez-vous déjà utilisée(s) ?

Cocher la ou les réponses

- Diagramme de Gantt
- Réseau PERT
- Planning chemin de fer

Reprendre plus tard

Sortir et effacer le questionnaire

Suivant >>

Français ▾

Visualisation 4D du planning

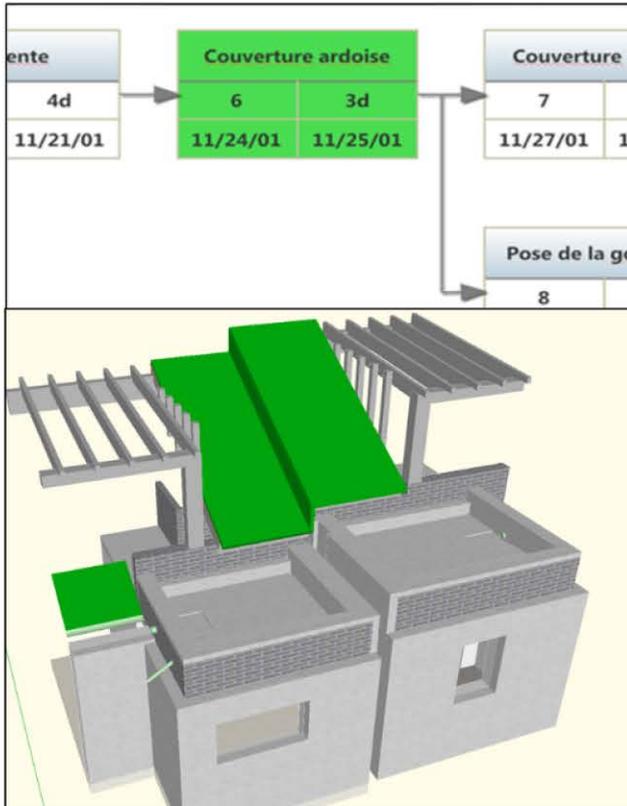
La 4D est une représentation nouvelle qui associe le planning à un modèle 3D de l'ouvrage.

Dans cette partie, nous allons prendre l'exemple de besoins liés à la planification et vous demander de commenter des visualisations proposées pour y répondre, en restant dans le cadre l'ordonnement des activités.

À cet effet, nous prenons l'exemple d'un chantier de construction de 13 maisons unifamiliales identiques à 3 niveaux. Plusieurs entreprises interviennent pour la réalisation des différentes tâches et un superviseur est chargé de coordonner l'ensemble du chantier. Il faut noter qu'en général, selon le contexte du projet, un superviseur peut être un ingénieur, un architecte ou un autre professionnel de la maîtrise d'oeuvre.

* Le superviseur est responsable de la coordination de l'ensemble des activités. Parmi ses besoins, il doit organiser le phasage (séquençage) des activités, et vérifier les durées prévues pour chaque tâche.

A votre avis, cette représentation est-elle appropriée pour l'aider dans l'ordonnancement des activités ?



Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Très appropriée
- Satisfaisant
- Peu appropriée
- Pas du tout appropriée

Veillez saisir votre commentaire ici:

i N'oubliez pas de commenter.

* Les besoins identifiés pour le superviseur (phasage des activités, vérification des durées) vous semblent-ils pertinents par rapport à son rôle ?

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Oui
- Oui, mais
- Non

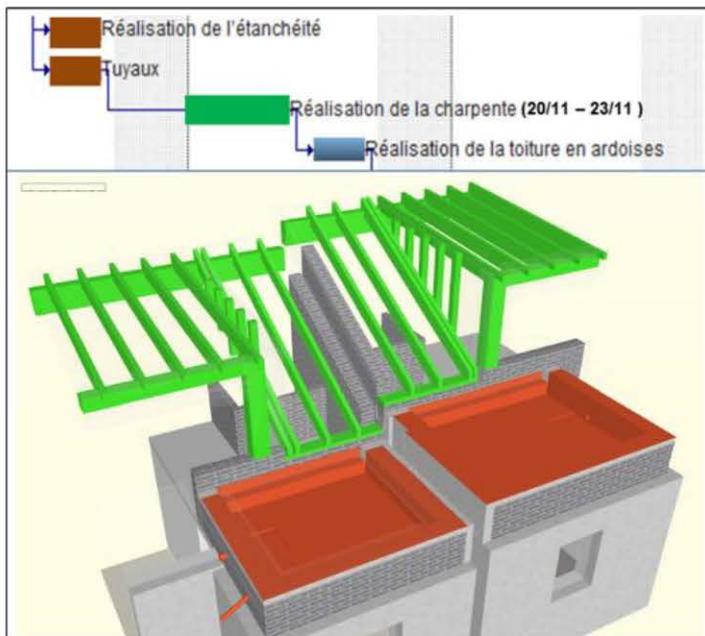
Veillez saisir votre commentaire ici:

i N'oubliez pas de commenter.

*

L'entreprise A est responsable de la **réalisation de la charpente sur une seule des 13 maisons**. Parmi ses besoins, elle doit comprendre la date de début et la durée de son activité. Elle a également besoin de savoir qui travaille avant et après elle, et appréhender les contraintes spatiales liées à son activité.

A votre avis, cette représentation est-elle appropriée pour l'aider dans l'ordonnancement des activités ?



Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Très appropriée
- Satisfaisant
- Peu appropriée
- Pas du tout appropriée

Veillez saisir votre commentaire ici:

 N'oubliez pas de commenter.

*

Les besoins identifiés pour l'entreprise A (date de début et durée de son activité, qui travaille avant et après elle, contraintes spatiales liées à son activité) vous semblent-ils pertinents ?

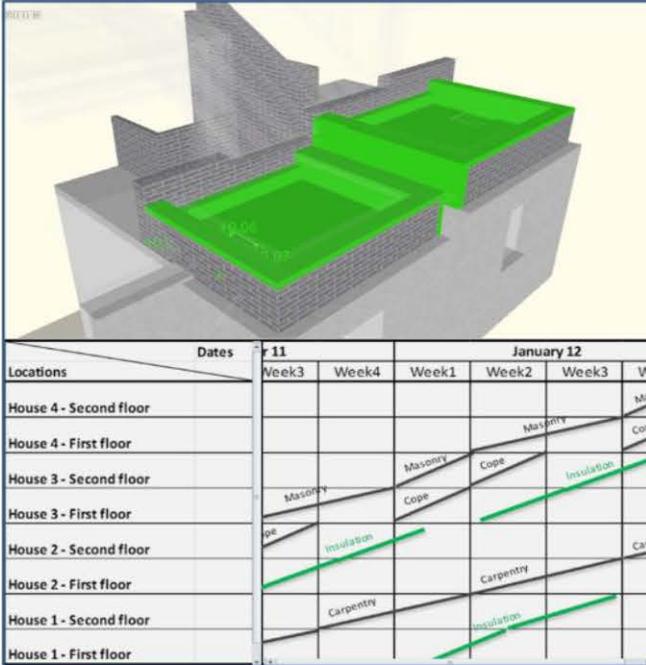
Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Oui
- Oui, mais
- Non

Veillez saisir votre commentaire ici:

L'entreprise B est responsable de la réalisation des mêmes tâches d'isolation sur l'ensemble des 13 maisons. En dehors d'autres besoins (voir entreprise A), elle a besoin de former plusieurs équipes travaillant en même temps sur différentes maisons.

A votre avis, cette représentation est-elle appropriée pour l'aider dans l'ordonnancement des activités ?



Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Très appropriée
- Satisfaisant
- Peu appropriée
- Pas du tout appropriée

Veuillez saisir votre commentaire ici:

i N'oubliez pas de commenter.

Les besoins identifiés pour l'entreprise B (date de début et durée de son activité, qui travaille avant et après elle, contraintes spatiales liées à son activité, formation de plusieurs équipes parallèles) vous semblent-ils pertinents ?

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

- Oui
- Oui, mais
- Non

Veuillez saisir votre commentaire ici:

i N'oubliez pas de commenter.

Reprendre plus tard

Sortir et effacer le questionnaire

Envoyer

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	5
RÉSUMÉ	7
ABSTRACT	9
SOMMAIRE.....	11
LISTE DES ABRÉVIATIONS	15
INTRODUCTION	17
Le contexte du travail.....	17
La problématique de recherche.....	18
Le plan de la thèse	19
1 PLANIFICATION DES PROJETS DE CONSTRUCTION : PRATIQUES ET ENJEUX ..	27
1.1 Gestion des projets de construction et importance de la planification	27
1.1.1 Gestion de projet : quelques concepts de base.....	28
1.1.1.1 Généralités sur la notion de projet et la gestion de projet.....	28
1.1.1.2 Quelques définitions	29
1.1.2 Particularités des projets de construction	30
1.1.2.1 Le secteur de la construction	31
1.1.2.2 Les projets de construction.....	34
1.1.2.3 Collaboration problématique et complexité dans un projet de construction	35

1.1.3	Les facteurs de succès d'un projet de construction	37
1.1.3.1	Les indicateurs de succès	38
1.1.3.2	Les facteurs de succès des projets de construction.....	39
1.2	La planification de la construction et la simulation 4D/nD de la construction.....	42
1.2.1	Qu'est-ce que la planification de la construction ?	42
1.2.1.1	Pourquoi planifier ?	43
1.2.1.2	Que planifie-t-on ?	44
1.2.1.3	Qui planifie ?	46
1.2.1.4	Quel est le meilleur moment pour planifier ?.....	48
1.2.2	La multiplicité dans la planification de la construction	49
1.2.2.1	Diversité des buts et des utilisateurs du planning	49
1.2.2.2	L'aspect collaboratif de la planification	50
1.2.2.3	Les modes de représentation du planning	52
1.2.3	Les méthodes de planification de la construction	55
1.2.3.1	La méthode du chemin critique (CPM)	56
1.2.3.2	La méthode PERT	57
1.2.3.3	Les méthodes pour les projets linéaires	59
1.2.3.4	Les nouvelles approches de planification	61
1.3	Bilan du chapitre.....	65
2	LA SIMULATION 4D/ND POUR PLANIFIER LA CONSTRUCTION : UN BESOIN DE COLLABORATION ET DE VUES ADAPTEES	69
2.1	La simulation 4D de la construction	69
2.1.1	Qu'est-ce que la simulation 4D ?	69
2.1.1.1	La quatrième dimension dans la construction.....	69
2.1.1.2	Principes et définitions de la CAO 4D	72
2.1.1.3	De la 4D à la nD.....	73
2.1.1.4	Intérêt de la simulation 4D/nD	73
2.1.2	Les aspects de la construction pris en charge par la simulation 4D/nD	76
2.1.2.1	La communication des idées, la facilitation du travail collaboratif et l'éducation	77
2.1.2.2	la planification logistique, l'aménagement du chantier et les travaux d'excavation	77
2.1.2.3	l'analyse de constructibilité et des alternatives d'ordonnancement des activités.....	78
2.1.3	Principaux outils logiciels et domaines d'application	80
2.1.3.1	Histoire des outils de simulation 4D de la construction	80
2.1.3.2	Les principaux outils actuels	81
2.1.3.3	L'essor du BIM et la simulation collaborative 4D/nD.....	84
2.2	Problématique, travaux similaires et approche de recherche	87
2.2.1	Besoin d'adaptation de la visualisation dans la simulation collaborative 4D/nD de la construction ..	87
2.2.1.1	Simulation 4D et visualisation.....	87
2.2.1.2	Les vues métiers.....	87
2.2.1.3	Hypothèse et objectifs de la thèse.....	88
2.2.2	Quelques travaux de recherche similaires	89
2.2.2.1	Conception de représentations 4D en utilisant des techniques de visualisation de l'information	89
2.2.2.2	Nouvelle conceptualisation 4D=2D+Temps	92
2.2.2.3	Utilisation de méthodes de planification linéaire dans la simulation 4D	93

2.2.3	Méthodes d'ingénierie des IHMs pour la conception d'interfaces adaptées	95
2.2.3.1	Critères existants pour la conception d'interfaces dans les collecticiels	95
2.2.3.2	Les méthodes de conception centrée utilisateur	96
2.2.3.3	Les méthodes centrées usage	97
2.2.3.4	Les assistants de visualisation	98
2.2.4	Une approche inspirée des méthodes de la science de la conception	99
2.2.4.1	La science de la conception (design science)	99
2.2.4.2	Notre démarche de recherche	100
2.2.4.3	Les mécanismes d'évaluation utilisés	101
2.3	Bilan du chapitre	103
3	THEORIES DE VISUALISATION DE L'INFORMATION ET DE VUES MULTIPLES COORDONNEES	109
3.1	Visualisation et représentations visuelles	109
3.1.1	Définitions et principes de base	109
3.1.1.1	La visualisation	110
3.1.1.2	La perception en visualisation	111
3.1.1.3	La mémoire	113
3.1.2	Représentations visuelles et vues en visualisation de l'information	114
3.1.2.1	Les types de données	114
3.1.2.2	Cartographie visuelle	116
3.1.2.3	Les propriétés préattentives	118
3.1.3	La création de représentations visuelles	122
3.1.3.1	Questionnements pour la création de représentations visuelles	122
3.1.3.2	Interactions et tâches de visualisation	123
3.1.3.3	Critères pour une bonne représentation visuelle	126
3.2	Les vues multiples coordonnées	127
3.2.1	L'utilisation de vues multiples	127
3.2.1.1	Les vues multiples	127
3.2.1.2	Quand utiliser les vues multiples	128
3.2.1.3	Les dimensions de la conception des vues multiples	130
3.2.2	Les règles d'utilisation des vues multiples	131
3.2.2.1	La règle de l'optimisation de la ressource espace/temps	131
3.2.2.2	La règle de l'évidence	132
3.2.2.3	La règle de la cohérence	133
3.2.2.4	La règle de la gestion de l'attention	133
3.2.3	Coordination des vues multiples	134
3.2.3.1	Les vues multiples coordonnées	134
3.2.3.2	Questionnements liés à la coordination des vues multiples	135
3.2.3.3	Les modèles et guidelines pour la coordination des vues multiples	136
3.3	Bilan du chapitre	140

4 TRAVAIL COLLABORATIF ASSISTÉ PAR ORDINATEUR ET VISUALISATION COLLABORATIVE.....145

4.1	Le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO).....	145
4.1.1	Définitions, approches et dimensions	145
4.1.1.1	Les collecticiels et le TCAO.....	145
4.1.1.2	Les dimensions clés du TCAO.....	146
4.1.1.3	Systèmes et approches du TCAO	148
4.1.2	Classifications des systèmes de TCAO	149
4.1.2.1	La classification fonctionnelle	149
4.1.2.2	La classification spatio-temporelle	150
4.1.2.3	La classification par codes.....	153
4.1.3	Nouvelles approches de description du travail collaboratif	155
4.1.3.1	Les personas de collaboration	156
4.1.3.2	Éléments de description du contexte de l'activité collective	157
4.1.3.3	Différents types de collaboration	158
4.2	La visualisation collaborative.....	160
4.2.1	Définitions et principaux concepts	160
4.2.1.1	Définition	160
4.2.1.2	Situations de visualisation collaborative.....	161
4.2.1.3	Modèle de référence	163
4.2.2	Les systèmes de visualisation collaborative	165
4.2.2.1	Le recensement de Grimstead et al.	166
4.2.2.2	La classification plus récente de Mouton et al.	166
4.3	Bilan du chapitre.....	167

5 CONCEPTUALISATION DE LA NOTION DE SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND ET RAFFINEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE173

5.1	Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD	173
5.1.1	La simulation.....	173
5.1.1.1	Qu'est-ce qu'une simulation ?	173
5.1.1.2	Les étapes d'une simulation	175
5.1.1.3	Simulation et visualisation	176
5.1.2	Collaboration et coopération dans le secteur de la construction	177
5.1.2.1	L'activité collective dans la construction	177
5.1.2.2	Collaboration, coopération et coordination	178
5.1.2.3	Les contextes de l'activité collective dans le secteur de la construction.....	179
5.1.3	La simulation collaborative 4D/nD de la construction	180
5.1.3.1	Composantes de la simulation collaborative 4D/nD	180
5.1.3.2	Les approches de planification 4D/nD	183
5.1.3.3	Quelques travaux sur la simulation collaborative 4D/nD de la construction	185
5.2	Raffinement de la problématique.....	188
5.2.1	Notre problématique par rapport aux théories du TCAO.....	188
5.2.1.1	Utilité et limites des approches classiques du TCAO pour notre problématique	188
5.2.1.2	Catégorisation des équipes de simulation collaborative de la construction	189

5.2.1.3	Limites de la visualisation collaborative	190
5.2.2	Notre problématique par rapport aux théories de visualisation	191
5.2.2.1	L'importance des vues métiers dans la simulation 4D de la construction	191
5.2.2.2	Les Vues Multiples Coordonnées 4D/nD dans la construction	192
5.2.2.3	Critiques des modèles de coordination de vues multiples	193
5.3	Bilan du chapitre.....	194
6	METHODE DE CONCEPTION DE VUES MULTIPLES ADAPTEES DANS LE CADRE DE LA SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND DE LA CONSTRUCTION.....	197
6.1	Une méthode de conception de vues multiples nD adaptées	197
6.1.1	Positionnement de la méthode proposée	197
6.1.1.1	Par rapport aux travaux du CRAI.....	197
6.1.1.2	Par rapport au Model View Definition IFC	199
6.1.1.3	Par rapport aux travaux proposant des vues innovantes pour le secteur de la construction ..	200
6.1.2	Méthode de conception de vues multiples nD adaptées	201
6.1.2.1	Quelques aspects de la méthode proposée.....	201
6.1.2.2	Description de la méthode.....	202
6.1.2.3	Approche de modélisation et formalisme pour la méthode	207
6.2	Métamodèles supportant la méthode	209
6.2.1	Le métamodèle de situation collaborative	209
6.2.1.1	Processus de construction du métamodèle.....	209
6.2.1.2	Version finale du métamodèle de situation collaborative	210
6.2.2	Le métamodèle de tâches de visualisation	213
6.2.2.1	Processus de construction du métamodèle.....	213
6.2.2.2	Version finale du métamodèle de tâches de visualisation	213
6.2.3	Le métamodèle de vue métier	217
6.2.3.1	Processus de construction du métamodèle.....	217
6.2.3.2	Version finale du métamodèle de vue métier	217
6.2.4	Le métamodèle de vues multiples coordonnées.....	221
6.2.4.1	Processus de construction du métamodèle.....	221
6.2.4.2	Version finale du métamodèle de vues multiples coordonnées	221
6.2.5	Utilisation de la méthode	225
6.2.5.1	Comment mettre en correspondance les vues métiers ?.....	225
6.2.5.2	Processus simplifié d'utilisation de la méthode proposée	226
6.3	Bilan du chapitre.....	229
7	APPLICATION A LA SIMULATION 4D DE LA CONSTRUCTION ET VALIDATION DE LA METHODE PROPOSEE	233
7.1	Étude de cas sur un chantier réel	233
7.1.1	Le contexte de l'étude de cas	233
7.1.1.1	Le contexte.....	233
7.1.1.2	Déroulement de l'étude et modalités.....	234
7.1.2	Application de la méthode proposée	235
7.1.2.1	Description de la situation collaborative	235

7.1.2.2	Les besoins de visualisation	240
7.1.2.3	Le choix des vues métiers adaptées.....	241
7.1.2.4	La composition de vues multiples 4D adaptées.....	245
7.2	Intérêt des vues proposées.....	251
7.2.1	Protocole d'enquête	251
7.2.1.1	Le mode opératoire	251
7.2.1.2	Contenu du questionnaire	252
7.2.1.3	Profils des personnes ayant répondu à l'enquête	252
7.2.2	Résultats de l'enquête	253
7.2.2.1	Connaissance des techniques de représentation du planning	253
7.2.2.2	Pertinence des besoins identifiés pour les différents acteurs	256
7.2.2.3	Pertinence des vues proposées aux différents acteurs	258
7.3	Discussions et bilan du chapitre.....	260
CONCLUSION.....		263
La problématique		263
L'apport original.....		264
	Conceptualisation de la notion de simulation collaborative 4D/nD	264
	Besoin d'adaptation de la visualisation dans les outils de simulation collaborative 4D/nD	264
	Les simulations 4D/nD comme systèmes de vues multiples coordonnées.....	265
	Proposition d'une méthode de conception de vues nD adaptées	265
	Des métamodèles comme langage structuré pour l'utilisation de la méthode	265
	Proposition d'une vue 4D originale	266
Limites et perspectives de la recherche.....		266
	Limites liées à l'interdisciplinarité de l'approche	267
	Limites dans la prise en compte des dimensions psychologiques et ergonomiques ainsi que des techniques d'interaction homme-machine.....	267
	Limites liées à l'évaluation des propositions	268
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		271
GLOSSAIRE		283
INDEX DES TERMES.....		289
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....		291
Liste des Figures		291
Liste des tableaux.....		293
	Documents annexes	295

DOCUMENTS ANNEXES.....	297
Annexe 1 : Guide d’entretien « Compréhension des pratiques de planification »	298
Annexe 2 : Questionnaire « Pertinence et intérêt des vues proposées »	303
TABLE DES MATIÈRES.....	309

CONCEPTION DE VUES METIERS DANS LES COLLECTIENS ORIENTES SERVICE. VERS DES MULTI-VUES ADAPTEES POUR LA SIMULATION COLLABORATIVE 4D/ND DE LA CONSTRUCTION

Résumé

La planification est essentielle pour la réussite des projets d'Architecture, Ingénierie et Construction (AIC). La simulation 4D de la construction est une approche innovante qui s'inscrit dans le développement de la maquette numérique BIM. Elle associe un modèle 3D de l'ouvrage au planning des activités de manière à en simuler la réalisation à travers le temps. Plusieurs travaux ont montré que la simulation 4D est particulièrement intéressante pour la comparaison de la constructibilité des ouvrages et des méthodes de travail, pour l'identification des conflits et des chevauchements, mais aussi comme un outil de collaboration pour les différents acteurs afin de discuter et planifier l'avancement du projet.

La planification de la construction est aujourd'hui une activité nécessairement collaborative. Pourtant, l'usage collaboratif de la simulation 4D reste limité, notamment à cause du manque d'adaptation des vues manipulées. En effet, la plupart des outils 4D actuels, même s'ils proposent cette « simulation collaborative » comme argument commercial, se contentent de proposer les mêmes vues « standards » à tous les acteurs (3D associé au Gantt). Pourtant les méthodes de travail traditionnelles dans le secteur s'appuient sur différentes représentations visuelles (ex. plans 2D, modèle 3D « blanc », modèle 3D « photoréaliste », tableaux de quantités) que les professionnels ont l'habitude de choisir en fonction de leurs besoins particuliers.

L'hypothèse de cette recherche doctorale considère que les vues proposées dans les outils de simulation collaborative 4D devraient être adaptées aux besoins de chacun des acteurs impliqués. L'objectif est de proposer une méthode de conception de vues multiples adaptées aux réels besoins métiers des participants à une simulation collaborative 4D. À cet effet, la recherche étudie les pratiques de planification dans le secteur de la construction, les théories de visualisation de l'information et de conception de vues, ainsi que le travail collaboratif assisté par ordinateur.

La proposition définit d'abord une conceptualisation originale de la simulation collaborative 4D de la construction. Elle se traduit ensuite par une structuration des besoins pour l'adaptation des vues, et une méthode structurée pour la composition de vues multiples 4D adaptées aux besoins de différents acteurs impliqués dans une simulation collaborative. Des métamodèles sont également conçus et fournissent aux utilisateurs de la méthode un langage structuré pour la conception progressive des multi-vues 4D.

Mots-clés : Construction, Collaboration, Simulation, CAO 4D, Visualisation, Vues métiers, Science de la conception, IHM.

BUSINESS VIEWS DESIGN IN SERVICE-ORIENTED GROUPWARE. TOWARDS ADAPTED MULTIVIEWS FOR COLLABORATIVE 4D/ND CONSTRUCTION SIMULATION

Abstract

Planning is crucial for the success of Architecture, Engineering and Construction (AEC) projects. 4D construction simulation is an innovative approach that is in line with the development of Building Information Modeling (BIM). It combines a 3D model of the building with the planning of activities in order to simulate its realization over time. Several studies have shown that 4D simulations are particularly useful for comparing the constructability of structures and working methods for the identification of conflict and overlap, but also as a collaborative tool for stakeholders to discuss and plan the project progress.

The construction planning is nowadays necessarily collaborative. However, the use of collaborative 4D simulation is still limited, mainly because of the lack of adaptation of views proposed to users. Indeed, most current 4D tools, even if they offer this "collaborative simulation" as sales argument, simply offer the same "standard" views (3D + Gantt chart) to all users. Yet traditional working methods in the sector rely on different visual representations (eg, 2D drawings, 3D model, "white" 3D model, "photorealistic" model, quantities table) that professionals usually choose according to their specific needs.

The hypothesis of this doctoral research considers that the views proposed in 4D collaborative simulation tools should be adapted to the needs of each stakeholder involved. The objective is to propose a method to design 4D multiple views adapted to the real business needs of participants in a collaborative 4D simulation. Thus, the research examines planning practices in the construction sector, and theories from Information Visualization, views design, and Computer-Supported Collaborative Work fields.

The proposal firstly defines an original conceptualization of collaborative 4D construction simulation. It then translates into a structuration of needs for views adaptation, and a structured approach to design 4D multiple views adapted to different stakeholders in a 4D collaborative simulation. Metamodels are also proposed and provide method users with a structured language for the progressive design of 4D multi-views.

Keywords: Construction, Collaboration, Simulation, 4D CAD, Visualization, Business Views, Design Science, HCI.