

Comparaison des outils informatiques pour la gestion des
modifications de conception/d'ingénierie entre les industries
soutenues par le BIM et le PLM

par

Oussama GHNAYA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 08 FÉVRIER 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Oussama Ghnaya, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Conrad Boton, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Érik Poirier, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Michel Guévremont, examinateur externe
Hydro-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 02 FÉVRIER 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le présent travail à été réalisé au sein du Laboratoire d'ingénierie des Produits, Procédés et Systèmes (LIPPS) et au sein du Laboratoire de Recherche sur les Technologies de l'Information en Construction (LaRTIC) de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Les travaux ont été appuyés et financés par le programme Mitacs Globalink et par l'École de technologie supérieure (ÉTS).

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur Louis Rivest qui m'a offert l'opportunité de poursuivre ma maîtrise sous son encadrement en me permettant de découvrir le monde du PLM. Merci de m'avoir appris à aller au fond des choses et à avoir l'œil critique d'un chercheur. Ce travail n'aurait pas vu le jour sans tes conseils et tes remarques pertinentes.

Je souhaite également remercier mon codirecteur Conrad Boton pour son soutien et sa présence tout au long de ce projet. Ton support sur le plan académique et aussi personnel m'a toujours motivé pour avancer sur mon projet!

Je tiens aussi à remercier nos partenaires industriels pour leurs collaborations et disponibilités durant ce projet. Le temps que vous avez consacré pour notre projet et votre partage d'information sont toujours bien appréciés.

Je remercie mes camarades du LIPPS pour tous les moments chaleureux qu'on a vécus ensemble. Hamid, Élodie, Marie-Léa, Jérémy, Wafa, Christian... vous êtes ma seconde famille!

Finalement, je remercie mes parents et ma sœur pour leur soutien tout au long de mes études malgré la distance.

Comparaison des outils informatiques pour la gestion des modifications de conception/d'ingénierie entre les industries soutenues par le BIM et le PLM

Oussama GHAYYA

RÉSUMÉ

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) et la gestion du cycle de vie des produits (PLM) sont deux approches holistiques basées sur la maquette numérique qui soutiennent respectivement les industries de la construction et de la fabrication. La comparaison entre BIM et PLM a fait l'objet de différentes études qui mentionnent que cette comparaison peut améliorer les deux approches à travers la pollinisation croisée. Cependant, peu de recherches portent spécifiquement sur la comparaison des outils informatiques adoptés dans ces approches. En effet, les outils informatiques jouent un rôle primordial, dans les approches BIM et PLM, pour faciliter la création et le partage des documents techniques, ainsi que pour optimiser les processus liés à leur modification. Les modifications qui impactent les documents techniques publiés sont fréquentes dans les industries où il y a des activités de conception, qu'il s'agisse d'un bâtiment ou de produits fabriqués en série comme des voitures. Ce type de modifications est connu sous le nom de 'modifications de conception' dans le secteur de la construction, tandis que le terme 'modifications d'ingénierie' est plutôt utilisé dans le secteur de la fabrication discrète. Ces modifications peuvent avoir des répercussions importantes sur le coût et le calendrier d'un projet. Par conséquent, une modification de conception/d'ingénierie doit être gérée par un processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie (D/ECM) bien structuré et soutenu par des outils informatiques. Le travail présenté dans ce mémoire compare les fonctionnalités offertes par les outils informatiques adoptés par quatre partenaires industriels des secteurs de la construction, de l'énergie et de l'aérospatiale au cours de leurs processus D/ECM. Vingt-deux entretiens semi-structurés ont été réalisés avec les partenaires industriels afin de documenter leur processus D/ECM et les outils informatiques mis en jeu par chacun d'eux. Les processus D/ECM des partenaires industriels sont d'abord présentés. Ensuite, les outils informatiques adoptés pour contrôler les documents sont identifiés et explorés. Enfin, les fonctionnalités offertes par ces outils sont comparées en montrant leurs principales similitudes et différences. Cette étude montre que les outils PLM présentés dans les études de cas offrent certaines fonctionnalités avancées, notamment en ce qui concerne la gestion des révisions, l'analyse d'impact et la gestion des flux de travail.

Mots-clés : Gestion des modifications de conception, Gestion des modifications d'ingénierie, Modélisation des données du bâtiment, Gestion du cycle de vie des produits, Gestion des documents, Outils informatiques, Processus, Comparaison

Comparison of IT tools for Design/Engineering Change Management between BIM- and PLM- supported industries

Oussama GHNAYA

ABSTRACT

Building Information Modeling (BIM) and Product Lifecycle Management (PLM) are two holistic digital mock-up-based approaches that support the construction and manufacturing industries respectively. The comparison between BIM and PLM has recently been the subject of various research studies that mention that this comparison can improve both approaches through cross-pollination. However, few research studies shed light on the comparison of IT tools adopted in these environments. Indeed, IT tools play a key role in the BIM and PLM approaches to facilitate the creation and sharing of technical documents and the process of their modification. Changes that impact published technical documents are common in industries where there are design activities, whether it's a building or mass-produced product like cars. These types of changes are known as design changes in the construction industry, while the term engineering changes is more commonly used in the discrete manufacturing sector. These changes can have a significant impact on the cost and schedule of a project. Therefore, a design/engineering change must be managed by a well-structured design/engineering change management (D/ECM) process supported by IT tools. This study compares the functionality offered by the IT tools adopted by four industrial partners from the construction, energy and aerospace sectors during their D/ECM processes. A total of 22 semi-structured interviews were conducted with the industrial partners to document their D/ECM processes and IT tools. In this study, the D/ECM processes of the industrial partners are first briefly presented. Then, the IT tools adopted for document control are identified and explored. Finally, the functionalities offered by these tools are compared showing their main similarities and differences. This study shows that the PLM tools presented in the case studies offer some advanced functionalities, especially with respect to revision management, impact analysis and workflow management.

Keywords: Design Change Management, Engineering Change Management, Building Information Modeling, Product Lifecycle Management, Document management, IT Tools, Process, Comparison

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 La modélisation des données du bâtiment (BIM) et la gestion de cycle de vie du produit (PLM).....	5
1.1.1 La modélisation des données du bâtiment (BIM).....	5
1.1.2 La gestion de cycle de vie du produit (PLM)	7
1.1.3 Comparaison entre le BIM et le PLM.....	9
1.2 Gestion des modifications de conception dans l'industrie de la construction	11
1.2.1 Causes et impacts des modifications de conception	11
1.2.2 Processus proposés.....	13
1.2.3 Méthodes et outils	15
1.3 Gestion des modifications d'ingénierie dans l'industrie de la fabrication.....	19
1.3.1 Causes et impacts des modifications d'ingénierie	19
1.3.2 Processus proposés.....	20
1.3.3 Méthodes et outils	22
1.4 Synthèse	28
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	31
2.1 Objectifs de recherche.....	31
2.1.1 Objectif général.....	31
2.1.2 Objectifs spécifiques.....	31
2.2 Méthodologie et approche de recherche	32
2.2.1 Collecte des données.....	32
2.2.2 Cartographie des processus.....	33
2.2.3 Comparaison	34
CHAPITRE 3 COMPARISON OF IT TOOLS FOR DESIGN/ENGINEERING CHANGE MANAGEMENT BETWEEN BIM- AND PLM-SUPPORTED INDUSTRIES	36
3.1 Introduction.....	37
3.2 Background concepts and literature.....	39
3.2.1 Design Change Management in the BIM-supported industry	39
3.2.2 Engineering Change Management in PLM-supported industry	42
3.2.3 Summary	46
3.3 Methodology	46
3.4 Case study	48

3.4.1	Presentation of the industrial partners.....	48
3.4.2	D/ECM Process.....	49
3.4.3	IT tools involved in Partners' D/ECM process	52
3.4.4	Comparative analysis	54
3.5	Discussion.....	60
3.6	Conclusion	61
CHAPITRE 4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....		63
4.1	Discussion des résultats	63
4.2	Défis d'adoption des outils informatiques	64
4.3	Limitations	64
4.4	Perspectives.....	65
CONCLUSION		67
ANNEXE I ROLE OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE DESIGN CHANGE MANAGEMENT PROCESS		69
ANNEXE II LES PROCESSUS DE GESTION DES MODIFICATIONS DE CONCEPTION DU PARTENAIRE A.....		84
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		85

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Les causes des modifications de conception.....12
Tableau 1.2	Les processus de gestion des modifications de conception proposés.....14
Tableau 3.1	D/ECM process' phases for the industrial partners50
Tableau 3.2	Adopted tools in D/ECM process52
Tableau 3.3	Comparison of available D/ECM tools' functionalities58

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	L'architecture de client-serveur PLM.....8
Figure 1.2	Le cadre de catégorisation de la recherche ECM.....23
Figure 2.1	La démarche de recherche adoptée34
Figure 3.1	Research methodology48
Figure 3.2	Approach for comparing IT Tools functionalities for a D/ECM process ..55

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEC	Architecture, Engineering, and Construction
BIM	Building Information Modeling
BLM	Building Lifecycle Management
BOM	Bill of Materials
BPMN	Business Process Model and Notation
CAD	Computer Aided Design
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CCT	Change Control tool
CM	Configuration Management
D/ECM	Design/Engineering Change Management
DCM	Design Change Management
DCR	Design Change Request
EC	Engineering Change
ECM	Engineering Change Management
ECN	Engineering Change Notification
ECO	Engineering Change Order
ECP	Engineering Change Proposal
ECR	Engineering Change Request
EDMS	Electronic Document Management System

FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
GUID	Globally Unique Identifier
IAO	Ingénierie Assistée par Ordinateur
IFC	Industry Foundation Classes
OCR	Optical Character Recognition
PCO	Proposal Change Order
PDM	Product Data Management
PIM	Product Information Management
PLM	Product Lifecycle Management
PS	Product Structure
RFI	Request For Information

INTRODUCTION

La modélisation des données du bâtiment, aussi connue sous le nom de Building Information Modeling (BIM), a été introduite dans l'industrie de la construction en tant qu'une approche métier basée sur la maquette numérique. Le BIM est décrit comme l'une des approches les plus prometteuses pour parvenir à la numérisation du secteur de la construction sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments (Krämer & Besenyői, 2018). La numérisation dans le secteur de la construction est arrivée un peu tard par rapport à d'autres secteurs comme l'automobile et l'aéronautique, où la gestion du cycle de vie des produits, connue comme l'approche de Product Lifecycle Management (PLM), est établie depuis les années 90 (Stark, 2015). Le BIM et le PLM présentent plusieurs similitudes en ce qui concerne le partage des données, la gestion de projet, ainsi que l'organisation des équipes autour des livrables et des délais (Jupp & Nepal, 2014). Cependant, le BIM et le PLM diffèrent également en termes d'outils, de flux de travaux et de normes disponibles pour réaliser chaque approche (Botton et al., 2016). Le BIM offre des fonctionnalités importantes pour gérer les différents processus de conception et de construction, mais il lui manque encore un mécanisme de suivi et de gestion (Cheutet, Sekhari, & Corbeaux, 2018). En revanche, le PLM offre de puissantes capacités de gestion pour l'ensemble du cycle de vie de tout projet construit (Cheutet et al., 2018). Ces capacités amènent des chercheurs à argumenter qu'une comparaison entre le BIM et le PLM peut être utile pour améliorer les deux mondes par une pollinisation croisée (Pourzare, Rivest, & Botton, 2020).

Récemment, des travaux de recherche se sont concentrés sur la comparaison entre le BIM et le PLM selon différents points de vue (Jupp et Nepal 2014) (Botton et al. 2018) (Di Biccari et al., 2018). Cependant, bien que ces recherches constituent des jalons importants dans la comparaison entre BIM et PLM, on remarque que l'approche PLM est utilisée pour être la lentille à travers laquelle nous pouvons voir l'approche BIM pour identifier les lacunes dans les processus technologiques BIM actuels. Une comparaison entre les deux approches à partir

d'une pratique commune en identifiant leurs similitudes et leurs différences peut conduire alors à une amélioration fructueuse des deux approches.

Parmi les processus primordiaux dans les industries soutenues par le BIM et le PLM, on trouve le processus de gestion des modifications techniques. Ces modifications concernent les documents de construction émis et elles sont connues sous le nom de modifications de conception « Design Changes (DCs) » dans l'industrie soutenue par le BIM. Dans l'industrie soutenue par le PLM, les modifications d'ingénierie concernent plutôt les documents libérés après la phase de conception et elles sont connues sous le nom de modifications d'ingénierie « Engineering Changes (ECs) ». Selon Jarratt et al. (2011), une modification d'ingénierie peut être traitée et comprise sous différents angles, les principaux étant les perspectives de processus, d'outils et de produits. Différentes études ont proposé divers processus et outils pour gérer les modifications de conception dans l'industrie de la construction (Hao et al., 2008) (Ibbs, Wong, & Kwak, 2001) (Motawa et al., 2007) (Mejlænder-Larsen, 2017) et les modifications d'ingénierie dans les industries manufacturières (Dale, 1982) (Huang & Johnstone, 1995) (Riviere, DaCunha, & Tollenaere, 2003) (Maurino, 1993) (Maull, Hughes, & Bennett, 1992).

Des outils informatiques sont exploités pour s'assurer de la gestion des documents au cours de l'exécution de ces processus. Il faut tout d'abord clarifier que dans cette étude on adopte la définition de document donnée par la norme IEC 824045-1 (IEC, 2001) où le concept de document couvre non seulement les documents traditionnels sur papier, mais aussi les informations numériques traitées comme une unité (un conteneur fermé d'informations). Les outils adoptés par les industries soutenues par le BIM et le PLM pour gérer les documents offrent diverses fonctionnalités qui peuvent être exploitées pendant un processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie (Design/Engineering Change Management (D/ECM)).

Cette étude vise à comparer les fonctionnalités des outils de gestion de documents adoptés pendant les processus D/ECM chez quatre partenaires industriels. Les quatre études de cas

comprennent deux entreprises soutenues par le BIM, une entreprise de l'industrie aéronautique soutenue par le PLM et une industrie du secteur de l'énergie soutenue par BIM/PLM. Pour y parvenir, une série d'entretiens semi-structurés a été menée avec les partenaires industriels afin de cartographier leurs processus D/ECM et d'identifier les outils de gestion des documents qu'ils utilisent. Ensuite, les fonctionnalités de ces outils ont été étudiées et comparées.

Ce travail présente un mémoire par article qui s'articule autour de cinq chapitres. Le premier chapitre présente tout d'abord les définitions du BIM et du PLM ainsi que les comparaisons faites entre ces deux approches. Ensuite, on présente les différents processus de gestion des modifications de conception et d'ingénierie dans l'industrie s'appuyant sur le BIM et le PLM. Les méthodes et les outils proposés pour gérer ces modifications seront également abordés. Le deuxième chapitre s'attarde sur les objectifs et la méthodologie de recherche adoptée. Le troisième chapitre présente l'article intitulé *Comparison of IT tools for Design/Engineering Change Management between BIM- and PLM- supported industries*, issu des résultats de la recherche et soumis à la revue internationale *Computers in Industry*. Ce travail décrit tout d'abord les processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie chez quatre partenaires industriels qui viennent de l'univers de la construction, l'énergie, et l'aéronautique. Ensuite, le travail identifie et compare les fonctionnalités des outils informatiques adoptés durant le processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie chez les partenaires industriels. Le chapitre 4 propose une discussion pour ensuite terminer le rapport avec une conclusion sur la portée du travail dans le chapitre 5.

Durant cette étude, nous avons eu l'occasion de comparer deux processus de gestion des modifications de conception chez l'un de nos partenaires de construction pour étudier les avantages portés par les outils de gestion des documents électroniques durant ces processus. Cette comparaison a fait l'objet d'un article de conférence intitulé *ROLE OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE DESIGN CHANGE MANAGEMENT PROCESS* (Annexe I). Cet article a été présenté à la conférence annuelle de la Société Canadienne de Génie Civil (SCGC 2022).

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de présenter la littérature pertinente à notre étude. À cet effet, il présente les études liées à la comparaison entre le BIM et le PLM. De plus, ce chapitre vise à offrir une bonne compréhension de la gestion des modifications de conception dans l'industrie de la construction ainsi que la gestion des modifications d'ingénierie dans l'industrie de la fabrication en présentant les processus et les outils de gestion des modifications de conception/d'ingénierie adoptés dans chaque univers.

1.1 La modélisation des données du bâtiment (BIM) et la gestion de cycle de vie du produit (PLM)

La modélisation des données du bâtiment (BIM) et la gestion de cycle de vie du produit (PLM) sont deux approches holistiques basées sur les maquettes numériques qui soutiennent respectivement les industries de la construction et de la fabrication. Dans cette section, on s'intéresse tout d'abord à présenter brièvement l'historique et les principes de chaque approche. Ensuite, on présente les différents travaux qui visaient à comparer le BIM et le PLM selon différentes perspectives.

1.1.1 La modélisation des données du bâtiment (BIM)

L'information constitue un facteur clé pour la réussite des projets de construction. Dans une industrie aussi fragmentée, avoir la bonne information au bon moment est critique pour la prise de décisions. Les dessins techniques ont longtemps constitué le moyen principal pour partager l'information entre les différents participants d'un projet de construction. Aujourd'hui, et avec le virage numérique vécu dans la décennie précédente, le BIM est devenu le centre d'échange d'information. Le BIM est un terme qui comporte diverses définitions pour différents professionnels (Amor & Ge, 2002). Certains professionnels définissent le BIM

comme une technologie représentée par un logiciel, tandis que pour d'autres, il s'agit d'un processus de conception et de documentation des informations sur les bâtiments (Jaly Zada, 2016). D'autres encore définissent le BIM comme une approche totalement nouvelle qui nécessite la mise en œuvre de nouvelles politiques, de nouveaux contrats et de nouvelles relations entre les parties prenantes du projet (Underwood & Isikdag, 2009). En fait, le BIM est tout cela. Il s'agit d'un réseau mutuellement dépendant de politiques, de processus et de technologies qui, ensemble, forment une approche permettant de gérer la conception et la construction d'un bâtiment de façon numérique tout au long de son cycle de vie (Succar, 2009) (Kassem et al., 2014).

Si l'introduction de la CAO dans l'environnement de conception remonte à 1963 avec l'outil " Sketchpad " développé par Sutherland durant sa thèse de doctorat au Massachusetts Institute Technology (MIT) (Tornincasa et al., 2010), la théorisation du BIM n'est pas aussi récente qu'on pourrait le croire, puisqu'elle date de 1974 (Eastman et al., 1974), et est donc antérieure à la création d'AutoCAD (1982), le logiciel de CAO le plus connu utilisé dans le secteur d'architecture, d'ingénierie et de construction (Architecture, Engineering and Construction « AEC »).

Dans les années suivantes, d'autres éditeurs de logiciels ont commencé à développer ce qu'on l'appelle aujourd'hui le BIM, en commençant par Graphisoft avec Archicad (1987), qui est l'évolution de son logiciel de CAO Radar CH et ensuite OpenBIM de Nemetschek (1997) et Triform BIM de Bentley (1998) (Daniotti et al., 2020).

Les chercheurs ont étudié les mécanismes et les implications du BIM pendant de nombreuses années avant que l'expression "Building Information Modeling" ne soit utilisée comme un nouveau terme pour décrire la conception, la construction et la gestion des installations virtuelles (Jaly Zada, 2016). Le terme "Building Product Models" a été utilisé aux États-Unis pour décrire le concept de BIM, tandis que le terme "Product Information Model" a été utilisé en Europe. Lorsque les nomenclatures européennes et américaines ont fusionné, le terme "Building Information Modeling" a vu le jour au début de 2002 (Eastman et al., 2008).

Le BIM n'est donc pas un objet ou un type de logiciel, mais plutôt une activité humaine qui implique d'importants changements de processus dans la conception et la construction. Pour cela, Eastman et al. (2008) ont intentionnellement utilisé le terme BIM pour décrire une activité (Building Information Modeling) plutôt qu'un objet (Building Information Model).

1.1.2 La gestion de cycle de vie du produit (PLM)

L'industrie soutenue par le PLM se caractérise par la variété et l'évolution rapide de ses produits. Différents départements sont impliqués dans la conception et la production de produits qui répondent aux exigences des clients. La bonne gestion des données liées aux produits demeure un facteur clé pour la réussite des entreprises. Le concept de PLM est apparu à la suite du développement des systèmes de Product Data Management (PDM) au milieu des années 1980. À cette époque, des entreprises telles que American Motors Corporation (AMC) ont commencé à développer des systèmes pour gérer leurs données de CAO afin de faire face à la concurrence des autres constructeurs automobiles. Peu de temps après ces premiers développements PDM, AMC a produit un nouveau modèle qui a été appelé plus tard la "Jeep Grand Cherokee". En raison du succès rencontré par AMC, Chrysler a acheté AMC et a intégré ses technologies PDM. Ensuite, Chrysler a attribué aux technologies PDM/PLM le mérite d'être le producteur le moins cher, enregistrant des coûts de développement qui étaient la moitié de la moyenne de l'industrie au milieu des années 1990 (Sidney Jr, 2008). Ces entreprises ont commencé à utiliser les logiciels PLM d'IBM et de Dassault Systèmes à la fin des années 1990. Ces logiciels ont donné naissance à un système PLM alors appelé "ENOVIA". Le PLM est passé d'une mise en œuvre personnalisée et interne à des logiciels standardisés proposés par des fournisseurs de logiciels.

Le PLM a été étudié par divers auteurs sous différents angles. Il a été défini comme une solution de gestion des connaissances pour le cycle de vie des produits, et comme une approche stratégique qui propose un ensemble de solutions commerciales, intégrées à des technologies pouvant interagir avec d'autres solutions (Liu et al., 2009). Plusieurs définitions du PLM ont

été proposées, notamment (Jupp & Vishal, 2016; Botton et al., 2018; Mangialardi et al., 2017; Immonen & Saaksvuori, 2013; Terzi et al., 2010; Cheutet et al., 2018). L'une des définitions les plus complètes est celle de Terzi et al. (2010) :

"PLM is a business strategy for creating and sustaining a product-centric knowledge environment. It is rooted not only in design tools and data warehouse systems but also on product maintenance, repair and dismissal support systems. A PLM environment enables collaboration between and informed decision making by various stakeholders of a product over its lifecycle".

Un système PLM comporte deux composants informatiques principaux : un serveur de données et les clients PLM (Figure 1.1). Le serveur de données est le système informatique qui contrôle le serveur de fichiers et le système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR). Un serveur de données peut exister sur plusieurs emplacements ou peut être une combinaison de serveurs. Les clients PLM sont les postes de travail individuels qui accèdent aux informations sur le serveur de données.

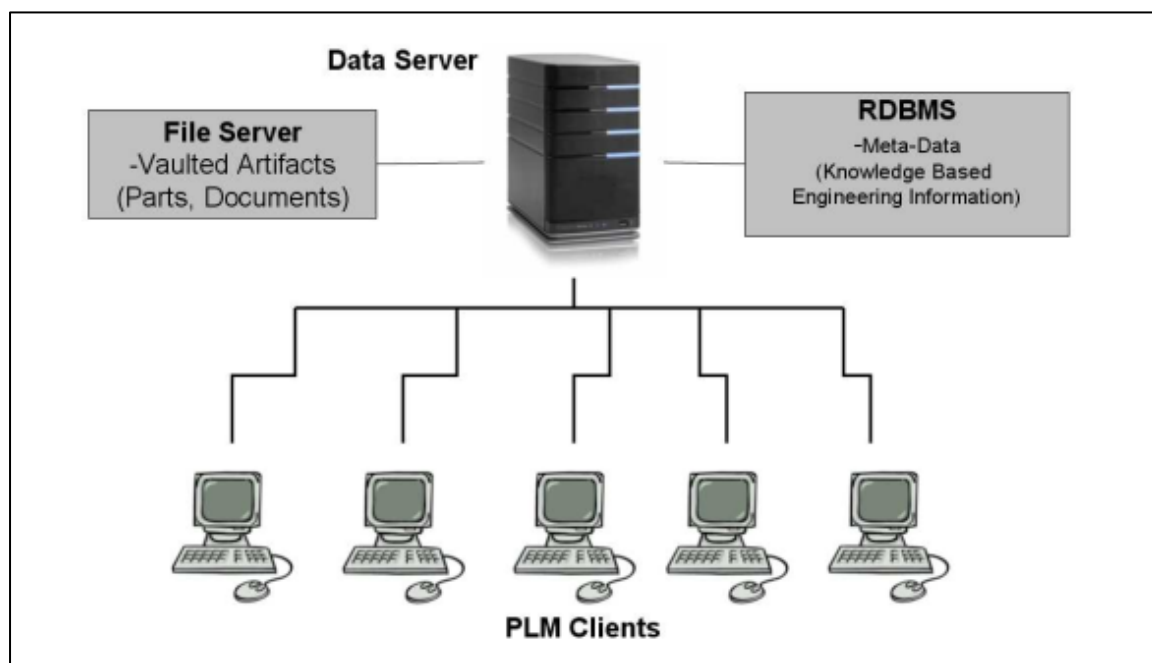


Figure 1.1 L'architecture de client-serveur PLM

Tiré de Xu & Liu (2003)

Le PLM fournit des outils et des méthodes pour résoudre les problèmes quotidiens d'information sur les produits et de la gestion de leurs cycles de vie. En bref, nous pouvons dire que le PLM est une approche stratégique qui fournit des informations tout au long du cycle de vie du produit. Les fonctions PLM modernes comprennent des flux de travaux, des fonctions de gestion de programme et de gestion de projet qui normalisent, automatisent et accélèrent la gestion des informations liées aux produits et permettent de contrôler plus efficacement le cycle de vie des produits afin que les entreprises puissent augmenter leurs flux de revenus en accélérant le rythme de commercialisation des produits innovants (Immonen & Saaksvuori, 2013).

1.1.3 Comparaison entre le BIM et le PLM

Le BIM et le PLM sont deux approches basées sur des outils et des modèles d'information (Botton et al., 2018). Cependant, bien que le BIM possède des fonctionnalités importantes pour gérer les différents processus de conception et de construction, il manque encore des mécanismes de suivi et de gestion, et c'est le principal point qui différencie le BIM et le PLM (Cheutet et al., 2018). En outre, les travaux de Mangialardi et al. (2017) indiquent que les principales caractéristiques manquantes dans l'industrie AEC pourraient bénéficier de l'application étendue du PLM dans l'industrie de la fabrication dans le partage des informations à différentes étapes du cycle de vie. Ainsi, l'approche PLM offre des fonctionnalités intéressantes pour résoudre un grand nombre des problèmes actuellement rencontrés dans l'approche BIM (Botton et al., 2018).

Récemment, de nombreux travaux se sont attachés à comparer le BIM et le PLM selon différents points de vue. Jupp & Nepal (2014) ont exploré les effets du BIM et du PLM sur la pratique professionnelle. Leur article s'appuie sur la littérature existante qui documente les expériences des communautés de pratique pour expliquer les déplacements des frontières professionnelles. Un examen de la littérature basée sur des études de cas compare la nature des

changements déclenchés par le PLM et le BIM par rapport aux nouvelles activités, aux rôles/responsabilités et aux compétences en matière de connaissances, ainsi qu'aux relations dans la chaîne d'approvisionnement. L'article synthétise ces changements et compare les expériences PLM et BIM entre elles pour mettre en évidence l'évolution continue de la pratique professionnelle et les leçons apprises.

Di Biccari et al., (2018) ont évalué le concept d'une vue de la "configuration" ou plus précisément de la "configuration de la structure du produit" dont la fabrication est complexe et si la configuration a déjà été appliquée à la gestion des processus ou des informations pour différentes phases du cycle de vie de l'industrie AEC. Ils pensent que le BIM pourrait être au BLM (Building Lifecycle Management) ce que le PIM (Product Information Modeling) est au PLM, et la structure du produit est le chaînon manquant dans l'approche BIM pour couvrir le cycle de vie complet, faisant du BLM la solution dont l'industrie de la construction a besoin pour gérer l'ensemble du cycle de vie. Ils ont présenté les vues de configuration dans le PLM, identifié les lacunes dans le processus technologique BIM actuel, puis proposé une structure de produit personnalisée basée sur des vues de configuration personnalisées sur le monde de la construction pour mettre en œuvre la gestion du cycle de vie des bâtiments (BLM).

Plus récemment, Botton et al. (2018) propose une comparaison entre BIM et PLM du point de vue de la Structure du produit (Product Structure (PS)) et de la nomenclature (Bill of Materials (BOM)). Ils ont exploré le concept de BOM et de PS dans les pratiques BIM existantes ainsi que le point de vue pour comparer BIM et PLM dans les industries manufacturières discrètes. Les résultats de la recherche indiquent que dans l'approche BIM actuelle, il est possible d'établir des correspondances entre certaines des représentations utilisées (Model Element Table, Quantity Take-Off, Design Brief, Contract Program, etc.) et la BOM et la PS dans la fabrication discrète. Cependant, et contrairement à ce que l'on observe dans le PLM, ces représentations sont toutes déconnectées et ne sont pas liées à des produits ou à des familles des produits. Cheutet et al. (2018) ont affirmé que les approches BIM et PLM semblent intéressantes dans le domaine du démantèlement nucléaire pour soutenir les besoins des entreprises en termes de collaboration, d'échange d'informations et de traçabilité tout au long

du processus de démantèlement. Ils ont analysé la littérature scientifique et industrielle afin d'extraire les exigences pour le déploiement d'une approche mixte BIM-PLM dans le contexte du déclassement nucléaire.

Les travaux mentionnés constituent des étapes importantes dans la comparaison entre BIM et PLM. Cependant, d'autres recherches semblent nécessaires pour couvrir des points de vue complémentaires de cette comparaison. Dans la suite de cette section, on s'intéresse à présenter le contexte de la gestion des modifications dans les industries soutenues par le BIM et les industries soutenues par le PLM.

1.2 Gestion des modifications de conception dans l'industrie de la construction

1.2.1 Causes et impacts des modifications de conception

Les modifications de conception sont fréquentes dans les projets de construction et peuvent provenir de diverses sources, pour de multiples raisons, à n'importe quel stade du projet (Hao et al., 2008). Une modification de conception est définie comme toute modification de la portée des travaux décrits par les accords du contrat (Sun et al. 2006). Elle peut se produire dans les domaines de l'architecture, de la structure, de la plomberie et du drainage, des travaux de chantier ou d'autres aspects de la construction (Alwi, Hampson, & Mohamed, 2002). Les modifications de conception sont aussi définies comme des ajouts, des omissions, ou des ajustements réguliers à la fois à la conception et à la construction de l'ouvrage, dans un projet de construction, qui se produisent après l'attribution du contrat et qui affecte les dispositions du contrat et les conditions de travail qui rendent la construction dynamique et instable (Abdul-Rahman, Wang, & Yap, 2017).

Les causes amenant à des modifications de conception peuvent varier d'un projet à un autre. Mohamad et al. (2012) ont classifié les causes des modifications de conception en trois catégories : en raison des clients, des professionnels, et des entrepreneurs (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Les causes des modifications de conception
Tiré de Mohamad, Nekooie, & Al-Harthy (2012)

Causes	Description
En raison des clients	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ajout d'un travail/portée (ne faisant pas partie de la portée initiale). ▪ Omission de travaux/portée d'application (réduction de la portée initiale). ▪ Modifications de la conception initiale (changements de la portée initiale). ▪ Un cahier des charges initial peu clair ▪ Désir d'utiliser des matériaux alternatifs/une nouvelle technologie (peut exiger des détails différents et une coordination avec les fournisseurs). ▪ Désir d'utiliser de meilleures spécifications (par exemple, pour prolonger la durée de vie de la structure, pour une meilleure performance). ▪ Connaissance insuffisante du site proposé (par exemple, possibilité d'installations souterraines, structures antérieures, conditions antérieures du site).
En raison des professionnels	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conception incorrecte/amélioration de la conception (par exemple, pour rectifier les erreurs de conception, pour adopter de meilleurs détails, pour simplifier la conception afin de faciliter la construction). ▪ Informations incohérentes dans les dessins (par exemple, un détail structurel ne correspond pas à un détail architectural). ▪ Incohérence entre les documents contractuels (par exemple, les dessins, le cahier des charges, le devis descriptif). ▪ Étude géotechnique insuffisante ou interprétation erronée des résultats (par exemple, couches rocheuses inattendues, sol meuble, nappe phréatique élevée). ▪ Détails insuffisants sur l'état actuel du site (par exemple, conflits avec des installations souterraines, conflits avec des structures adjacentes, etc.)
En raison des entrepreneurs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Désir d'utiliser les matériaux disponibles. ▪ Désir d'utiliser des méthodes de construction alternatives pour gagner du temps. ▪ Désir d'utiliser des méthodes de construction alternatives pour économiser de l'argent. ▪ Correction des erreurs de construction. ▪ Amélioration de la qualité des travaux sur le site.

Les modifications de conception peuvent avoir un impact significatif sur les dépassements de coûts et de délais d'un projet (Moayeri, Moselhi, & Zhu, 2017). Burati et al. (1992) ont identifié

dans leur recherche que les modifications de conception peuvent augmenter les coûts de conception de 2,1 à 21,5%. En outre, les modifications de conception sont considérées comme l'une des causes importantes d'échec des projets (Hallock, 2006).

1.2.2 Processus proposés

Les modifications de conception doivent être gérées par un processus de gestion des modifications bien structuré afin d'éviter les litiges contractuels entre les parties prenantes (Hao et al., 2008). Cependant, il est essentiel de souligner qu'il n'existe pas un protocole spécifique pour gérer les modifications de conception dans l'industrie de la construction (Hindmarch, Gale, & Harrison, 2010). Dans la littérature, nous constatons que différents processus de gestion des modifications de conception ont été proposés pour gérer les modifications de conception et les flux d'informations (Hao et al., 2008; Huang, Yee, & Mak, 2001; Riviere et al., 2003).

Les chercheurs proposent différents processus de gestion des modifications de conception pour aider à contrôler et à guider les modifications de conception. Le tableau 1.2 présente cinq processus proposés dans la littérature par (Ibbs et al., 2001), (Sun et al., 2006), (Motawa et al., 2007), (Mejlænder-Larsen, 2017), et (Hao et al., 2008) :

Tableau 1.2 Les processus de gestion des modifications de conception proposés

Auteur	Année	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Ibbs, Wong, and Kwak	2001	Promouvoir une culture de modification équilibrée	Reconnaître la modification	Évaluer la modification	Mettre en œuvre la modification	Améliorer continuellement à partir des leçons apprises
Sun et al.	2006	Démarrage	Identification et évaluation	Approbation	Mise en œuvre et révision	
Motawa et al.	2007	Démarrage	Identification et évaluation	Approbation et propagation	Post changement	
Mejlænder-Larsen	2007	Identification	Filtration	Évaluation	Approbation	Mise en œuvre
Hao et al.	2008	Identification de la modification	Évaluation et proposition de la modification	Approbation de la modification	Mise en œuvre de la modification	Analyse de la modification

Les processus proposés par la littérature comptent 4 ou 5 phases. Pour donner un exemple, Hao et al. (2008) ont proposé un modèle de processus de changement de base avec cinq phases dans un ordre séquentiel :

- **Identifier les modifications** : un ensemble de règles est défini pour identifier les modifications tout au long du cycle de vie d'un projet de construction.
- **Évaluer et proposer les modifications** : déterminer les impacts en matière de coût et de temps de la modification sur les autres processus et équipes. À ce stade, une proposition d'ordre de modification (*Proposal Change Order "PCO"*) résumant le changement et ses conséquences est produite.
- **Approuver les modifications** : chaque modification proposée doit passer par un processus d'approbation formel. Ces processus sont prédéfinis en fonction du type des modifications et des contrats de construction. En outre, le processus d'approbation de modifications doit être approuvé par les professionnels impliqués dans le processus de modifications et par le client.

- **Mettre en œuvre les modifications** : la mise en œuvre des modifications fait référence à la gestion et à la coordination des informations, des documents, des conceptions/dessins et des enregistrements concernant les modifications et leurs conséquences. Pendant cette étape, un système opérationnel est nécessaire pour garantir que tous les aspects sont mis à jour, que toutes les parties sont notifiées et que toutes les activités sont réalisées correctement et bien documentées.
- **Analyser les modifications** : les données recueillies pendant la mise en œuvre des modifications sont utilisées pour évaluer des modifications et les performances du système.

1.2.3 Méthodes et outils

1.2.3.1 Méthodes proposées

Plusieurs auteurs ont étudié les outils informatiques disponibles pour mieux gérer les modifications de conception. On trouve dans la littérature que plusieurs méthodes et outils ont été proposés et développés pour aider les professionnels à prédire, évaluer, et déterminer l'impact des modifications.

Sun et al. (2006) ont développé une boîte à outils "Managing Change and Dependency (MCD) in Construction Projects" qui traite deux aspects importants de la gestion des modifications : la prédiction et la réaction à la modification par la redéfinition du flux de travaux. La boîte à outils aide à établir un modèle standard de processus de gestion des modifications. Cette boîte peut être utilisée pour prévoir les modifications et déterminer les causes potentielles d'une modification, ce qui aide l'équipe à prendre des mesures préventives pour limiter le nombre de modifications. Si la modification est inévitable, la boîte à outils aide à prévoir l'impact des différentes options pour cette modification. Pour la mise en œuvre de la modification, la boîte à outils aide à créer un flux de travail pour informer toutes les parties des implications de la modification sur leurs tâches. Après la mise en œuvre, la boîte à outils peut enregistrer la

modification, ainsi que ses causes et ses effets, afin d'être utilisée pour la réexaminer et l'analyser (Leçons apprises). Cependant, l'outil développé reste difficile à utiliser dans la pratique, car il dépend davantage des entrées manuelles par l'utilisateur des paramètres des caractéristiques du projet, ainsi que de leurs relations avec les causes et les effets des modifications. En outre, le fait de s'appuyer sur les entrées de l'utilisateur peut augmenter le risque de résultats d'évaluation inexacts.

Motawa et al. (2007) ont développé un système intégré de gestion des modifications pour permettre aux professionnels de gérer plus efficacement les modifications. Ce système comprend une méthodologie de planification et de contrôle dynamique (*Dynamic Planning and control Methodology (DPM)*) et un système de prédiction des modifications. Le système intégré aide à : planifier et contrôler les actions, identifier les impacts du retour d'expérience de la construction, planifier les projets en tenant compte des modifications potentielles, explorer les relations de cause à effet des événements de changement et examiner l'impact des modifications. Bien que le système actuel ait établi le potentiel de la gestion proactive des modifications, des efforts importants sont nécessaires pour assurer une mise en œuvre réaliste. Ainsi, d'autres simulations et expérimentations sont nécessaires pour établir des relations mathématiques robustes entre les autres variables du processus de modification.

Isaac & Navon (2008) ont proposé un outil de contrôle des modifications (*Change Control tool (CCT)*) qui permet d'identifier les implications d'une modification dès qu'elle est proposée. Cet outil aide les professionnels à évaluer les propositions liées à la modification. Il aide les professionnels à déterminer si une modification proposée pourrait faire dévier le projet de ses objectifs initiaux, tels qu'exprimés dans les exigences.

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer l'impact des modifications, on trouve la matrice de structure de conception aussi connue par *Design Structure Matrix (DSM)*. Hindmarch et al. (2010) ont proposé un modèle de gestion des modifications de conception de la construction incorporant l'analyse de la matrice de structure de conception (DSM) et des cartes de processus pour créer une liste de contrôle et une visualisation des tâches de reconception, en plus de créer

un enregistrement historique de l'impact d'un changement pour référence future. La DSM était aussi utilisée par Zhao et al. (2010) dans leur système de prévision des modifications proposé pour faciliter la gestion des modifications. La DSM est utilisée pour modéliser le processus qui peut se produire à la suite d'une modification. Les modifications peuvent être prédites en fixant les critères de modification pour chaque activité sous la forme d'un périmètre de reprise. La simulation de Monte Carlo est introduite pour analyser la probabilité de modification des activités impliquées dans le projet de construction. Selon Zhao et al. (2010), l'efficacité du système de prédiction est vérifiée en appliquant ce système à un projet de construction de bureaux.

Pilehchian et al. (2015) pour leur part ont développé une approche pour représenter, coordonner et suivre les modifications dans un environnement BIM multidisciplinaire collaboratif. À l'aide d'une étude de cas, une ontologie des changements de conception et une matrice de dépendance ont été développées, qui pourraient aider à automatiser la détermination de la propagation des modifications.

1.2.3.2 Utilisation des outils BIM pour la gestion des modifications de conception

Le BIM joue un rôle majeur pour faciliter la collaboration. Le BIM permet de modéliser et de gérer électroniquement une grande quantité d'informations contenues dans un projet de construction, de la conception à l'achèvement. Cependant, les modifications de conception demeurent inévitables, même dans l'approche BIM contemporaine (JalyZada, Tizani, & Oti 2014). Dans la suite, on présente des exemples d'utilisation des outils BIM qui étaient proposés dans la littérature pour gérer les modifications de conception.

JalyZada et al. (2014) ont développé une plate-forme BIM collaborative qui relève les défis de l'intégration de la gestion des versions des objets (en tant qu'approche de gestion des modifications) et d'un modèle IFC (en tant que représentation des données du BIM). Pour ce faire, de nouvelles extensions IFC sont proposées afin d'ajouter des concepts supplémentaires représentant l'historique des modifications apportées à tout objet du modèle. L'étude explore

également les possibilités d'ajouter ou de fusionner les informations de modification basées sur les objets aux modèles BIM existants pour permettre la représentation des intentions de conception et l'identification des modifications affectées numériquement et visuellement. Un système prototype est mis en œuvre en C#, à l'aide du cadre .NET et de la plate-forme Revit API. Ce travail conclut que le système proposé peut contribuer à améliorer la collaboration - en termes de suivi et de gestion des modifications affectés au cours du processus de conception multidisciplinaire.

Juszczyk, Tomana, & Bartoszek (2016) ont présenté un outil développé (BIMestiMate) qui permet la détection, la visualisation et la détermination des impacts sur les coûts et le calendrier en comparant deux révisions de modèles BIM données dans la norme Industry Foundation Classes (IFC). Ils définissent les principales fonctionnalités d'un outil BIM pour gérer efficacement les modifications de conception :

- Comparer deux ou plusieurs révisions au format IFC.
- Visualiser les modifications en mettant en évidence les éléments modifiés et leurs attributs.
- Déterminer le type de changement : modification, ajout, suppression.
- Analyser les impacts sur les coûts et le calendrier.
- Informer l'utilisateur des modifications de manière claire.

Mejlænder-Larsen (2017) a proposé un système de gestion des modifications pour gérer les modifications apportées à la conception détaillée et évaluer comment utiliser le BIM pour identifier leurs impacts. Ils indiquent le logiciel BIM aide les professionnels, à regrouper, à simuler et à analyser les modèles de bâtiments en conservant l'historique des modifications entre les révisions, à identifier et analyser les conflits, à détecter les déficiences et à procéder à une quantification. Quatre principaux niveaux d'état sont définis pour les objets de la conception détaillée. Il s'agit de S1 "Preliminaire", S2 "Libéré pour le contrôle de conception interdisciplinaire", S3 "Gelé" et S4 "Conception détaillée terminée".

Moayeri et al. (2017) ont présenté un modèle de visualisation basé sur le BIM qui détermine les impacts des modifications sur la quantité et les dépendances des composants en comparant le modèle "tel que planifié" et le modèle "tel que modifié". Un rapport détaillé est généré pour chaque modification prévue et son effet d'entraînement. Le modèle a été appliqué avec succès sur un cas de projet. Le modèle développé peut suivre les composants ajoutés, supprimés et modifiés pour les systèmes architecturaux, structurels et mécaniques.

Likhitruangsilp et al. (2018) ont présenté et testé un système comprenant des outils BIM dans une étude de cas réelle. Le système se compose de plusieurs outils intégrés ensemble (Revit, Dynamo, Microsoft Excel, VBA). Il permet de comparer les modèles BIM et de mettre en évidence les modifications via des couleurs. Les résultats de la comparaison peuvent être utilisés pour estimer les impacts sur les coûts et le calendrier. Les auteurs proposent d'intégrer un système de gestion du contrôle des documents pour rendre le flux de travail de la gestion des modifications plus efficace.

Les études précédentes montrent comment les outils BIM peuvent visualiser et suivre les modifications de conception dans un projet de construction. Ces études se concentrent principalement sur la détermination des impacts des modifications de conception sur les échéanciers et les coûts des projets de construction à l'aide des outils BIM. Cependant, peu d'études portent sur la description des fonctionnalités offertes par les outils BIM pour gérer les documents pendant un processus de gestion des modifications de conception.

1.3 Gestion des modifications d'ingénierie dans l'industrie de la fabrication

1.3.1 Causes et impacts des modifications d'ingénierie

L'industrie de la fabrication se caractérise par la complexité et l'évolution rapide de ses produits. Différents départements sont impliqués dans la conception et la production de produits hautement sophistiqués pour répondre aux exigences des clients. Les modifications d'ingénierie se produisent tout au long du cycle de vie d'un produit, depuis la sélection d'un concept jusqu'à la mise hors service du produit (Jarratt et al. 2011). Les modifications

d'ingénierie ont été définies par Jarratt et al. (2004a) comme une modification apportée aux pièces, aux dessins ou aux logiciels qui ont déjà été libérés au cours du processus de conception du produit. La modification peut être de n'importe quelle ampleur ou de n'importe quel type. Elle peut impliquer n'importe quel nombre de personnes et prendre n'importe quelle durée. En d'autres termes, les modifications d'ingénierie sont les changements et/ou les modifications des dimensions, des ajustements, des formes, des fonctions, des matériaux, etc. des produits ou des composants constitutifs qui interviennent après la libération de la conception du produit (Huang et al. 2001).

Jarratt et al. (2011) ont classé les causes des modifications d'ingénierie en deux catégories : les modifications émergentes et les changements initiés.

- Modifications émergentes : correction d'erreurs, sécurité, changement de fonction ou problèmes de qualité du produit.
- Modifications initiées : par les clients, l'équipe de vente et de marketing, l'équipe de support de produit, l'équipe de production, les fournisseurs, l'équipe d'ingénierie de produit, la direction de l'entreprise ou les législateurs.

Riviere et al. (2003) ont identifié les conséquences potentielles des modifications : impacts sur les coûts, impacts sur le calendrier du programme, impacts sur la performance du produit, impacts sur les fournisseurs et les partenaires de travail, impacts sur d'autres projets et programmes, des modifications supplémentaires liés au même problème, et impact sur les phases du cycle de vie.

1.3.2 Processus proposés

Pour contrôler les modifications qui peuvent être demandées, les entreprises adoptent des processus et des systèmes de gestion des modifications d'ingénierie (*Engineering Change Management (ECM)*). Le processus d'ECM est considéré comme un excellent exemple de processus opérationnel dans l'environnement PLM qui permet de modifier les produits de manière contrôlée (Stark, 2015).

Le processus d'ECM est le processus d'organisation, de contrôle et de gestion du flux de travail et de l'information pour les modifications d'ingénierie (Kocar & Akgunduz, 2010). Selon Hamraz, Caldwell, & Clarkson (2013), le processus d'ECM peut être résumé en fonction de ses objectifs :

- Éviter ou réduire le nombre de demandes de modifications d'ingénierie.
- Détecter les modifications rapidement lorsqu'elles se produisent.
- Traiter les modifications efficacement.
- Mettre en œuvre les modifications de manière efficiente.
- Apprendre en permanence pour l'avenir.

Il n'existe pas de processus ECM standard international que les entreprises peuvent suivre. Chaque entreprise doit créer et mettre en œuvre son processus (Stark, 2015). Cependant, certaines normes peuvent être adoptées comme guide, par exemple :

- ISO 9001 : 2008, " Systèmes de management de la qualité - Exigences. "
- ISO 10007, " Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour la gestion de la configuration. "

Selon Stark (2015), il est nécessaire de modéliser le processus d'ECM et de définir les nombreuses étapes, les réviseurs, les approubateurs et les procédures de signature. Si une activité ne se produit pas, la définition doit spécifier les hiérarchies afin qu'elle soit automatiquement remise à la plus haute autorité suivante.

Dans la littérature, nous constatons que plusieurs processus d'ECM sont proposés. Différents auteurs divisent le processus d'ECM en plusieurs phases :

- Dale (1982) - (i) procédure pour l'approbation ; (ii) procédure en approbation.
- Huang & Johnstone (1995) - (i) avant l'approbation ; (ii) pendant l'approbation ; (iii) après l'approbation.
- Riviere et al. (2003) - (i) proposition de modification technique ; (ii) enquête sur la modification technique ; (iii) réalisation de la modification technique.
- Maurino (1993) - (i) demande ; (ii) instruction ; (iii) exécution ; (iv) application.

- Maull et al. (1992) - (i) filtrage des propositions de changement technique ; (ii) élaboration d'une solution à la proposition ; (iii) évaluation de l'impact de la solution ; (iv) autorisation du changement ; (v) publication et mise en œuvre du changement.

Par exemple, les quatre phases proposées par Maurino (1993) pour le processus d'ECM sont décrites ci-dessous :

- Demande (Engineering Change Request – ECR): Dans cette phase, une demande de modification d'ingénierie (ECR) est faite pour signaler un problème.
- Instruction (Engineering Change Proposal – ECP): La demande est analysée et ses solutions potentielles sont proposées. L'une de ces solutions sera adoptée par un comité des modifications composé de diverses parties prenantes.
- Exécution (Engineering Change Order – ECO): Dans cette phase, la solution sélectionnée est mise en œuvre en mettant à jour les documents concernés.
- Application (Engineering Change Notice – ECN): L'applicabilité de l'ECO est évaluée afin de déterminer à quel moment ou à quelles unités la nouvelle définition du produit s'appliquera, et les communications appropriées sont lancées.

1.3.3 Méthodes et outils

1.3.3.1 Méthodes proposées

L'étude des outils informatiques dans le cadre de l'ECM a attiré l'attention de plusieurs auteurs depuis des décennies. Suite à une revue qui couvre les articles publiés entre 1980 et 1995, Wright (1997) a proposé un cadre de catégorisation de la recherche ECM structuré en arbre, qui distinguent deux grandes catégories de recherches connexes : (1) les outils informatiques pour l'analyse des problèmes des modifications d'ingénierie et la synthèse des solutions et (2) les méthodes pour la réduction de l'impact des modifications d'ingénierie. Ces catégories ont été subdivisées comme le montre la figure 1.2. Une structure similaire a été aussi proposé par (Ouertani, Gzara Yesilbas, & Lossent, 2004).

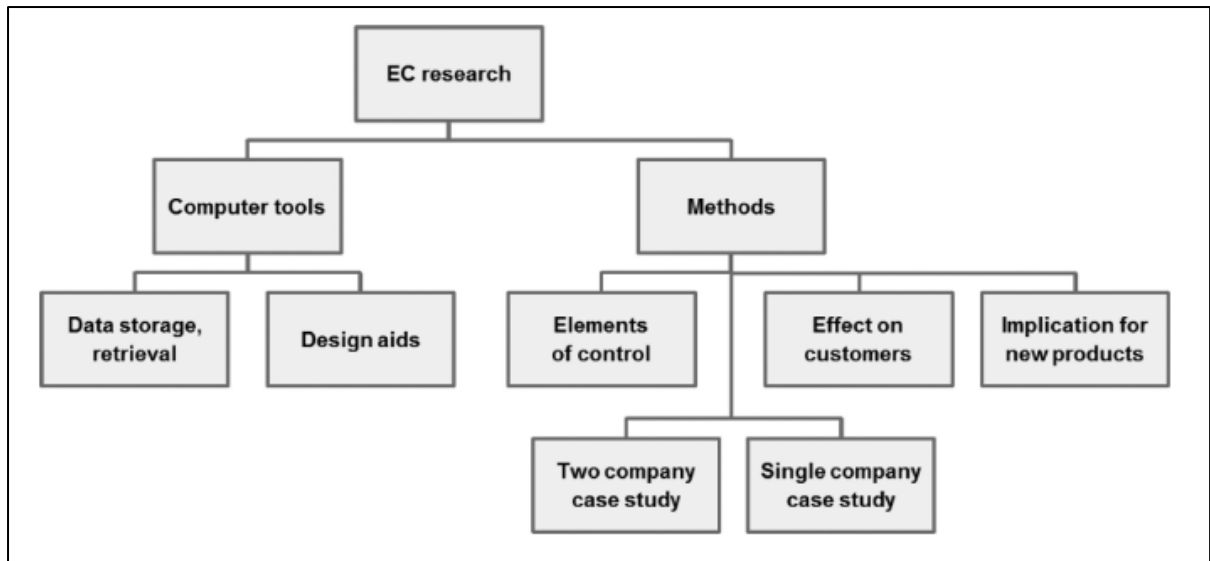


Figure 1.2 Le cadre de catégorisation de la recherche ECM

Tirée de Wright (1997)

Plus récemment, Jarratt et al. (2011) ont effectué une revue de la littérature qui fournit une couverture approfondie du domaine comprenant plus de 100 publications pertinentes. L'étude met en évidence les principaux articles sur les modifications d'ingénierie publiés jusqu'en 2010 et vise à fournir une couverture actualisée des sujets pertinents de l'ECM. Leur cadre de catégorisation classe les publications pertinentes en trois catégories principales, (1) Processus, (2) Outil, et (3) Produit, et deux catégories supplémentaires pour (4) Études générales, et (5) Stratégies et méthodes pour faire face aux modifications d'ingénierie. Contrairement aux cadres de catégorisation arborescents suggérés par Wright (1997) et Ouertani et al. (2004), ces catégories se chevauchent et permettent à un élément d'être affecté à plusieurs catégories.

Les études faites par Wright (1997), Ouertani et al. (2004), et Jarratt et al. (2011) montrent l'importance dédiée à l'utilisation des outils informatiques pour gérer les modifications d'ingénierie. En fait, les outils de support de l'ECM ont été principalement basés sur le format papier avec un support informatique occasionnel, auquel cas le support est utilisé pour garder une trace du processus et de la version des documents. Les systèmes PLM contribuent à utiliser le flux de travail et la gestion des données pour gérer les modifications d'ingénierie (Bergsjö, Catic, & Malmqvist (2008).

On trouve dans la littérature que plusieurs auteurs s'intéressent à développer ou bien à proposer des outils d'évaluation et d'analyse d'impact des modifications d'ingénierie, ou bien d'aide de prise de décision. Joshi, Ameri, & Dutta (2005) ont présenté une nouvelle méthodologie permettant l'évaluation systématique des demandes des modifications d'ingénierie, dans le cadre du processus global d'ECM. La méthode utilise les connaissances spécifiques à l'industrie, ainsi que les connaissances générées par les instances précédentes des modifications d'ingénierie, pour fournir un mécanisme efficace d'aide à la décision pour l'évaluation de la modification proposée et de ses effets en cascade. Selon les auteurs, les méthodes proposées pour utiliser les connaissances tirées des expériences passées peuvent également être utilisées dans d'autres applications, telles que l'analyse des défaillances, la conception de nouveaux produits, la détermination des expériences d'essai dans et le développement de médicaments.

Rouibah & R. Caskey (2002) ont présenté une approche paramétrique pour évaluer une modification d'ingénierie dans un environnement collaboratif et multi entreprises. La méthode exprime chaque décision d'ingénierie comme une valeur donnée à un "paramètre". Les paramètres dépendant les uns des autres sont couplés pendant la création et ces relations de couplage peuvent être utilisées pour propager les effets d'une modification d'ingénierie. Cependant, cette méthode exige une définition élaborée et cohérente des paramètres et des relations de couplage à chaque fois qu'une décision d'ingénierie est prise. En outre, il n'est pas toujours évident de s'attendre à ce que toutes les informations sur un produit ou un système puissent être capturées sous forme de paramètres.

Dans des travaux plus récents, Joshi et al. (2005) concluent que la seule gestion du flux de travail et des versions des identités des numéros de pièces, comme le fait le support ECM dans les systèmes PLM modernes, n'est pas suffisante, car elle ne tient pas compte du fait que les modifications d'ingénierie sont différentes d'un cas à l'autre. Ils proposent un pilote de flux de travail dynamique implémenté dans les systèmes PLM qui capture et réutilise également les connaissances sur les différentes modifications d'ingénierie afin d'améliorer continuellement le pilote de flux de travail dynamique. L'idée de capturer et de réutiliser les connaissances

généérées pendant l'ECM a été mise en œuvre par Lee (2006). La connaissance se réfère à la connaissance du produit qui est capturée et réutilisée afin d'aider les décideurs à prévoir les impacts des changements. Le travail qui relie l'ECM à l'architecture PLM sous-jacente a été présenté par Bergsjö et al. (2008). Les auteurs concluent qu'une approche mono-système fournit théoriquement le meilleur support pour l'ECM puisque toutes les informations nécessaires se trouvent en un seul endroit et sont gérées par un seul modèle d'information, mais que cette approche est impossible à réaliser en pratique, en partie à cause des différents besoins des différents domaines d'ingénierie et en partie à cause de l'intégration des différents fournisseurs dans l'entreprise étendue. Les auteurs concluent qu'une approche plus réaliste est l'application d'une architecture modulaire avec une couche d'intégration par laquelle on accède à chaque ensemble local de bases de données et d'applications.

Tavcar & Duhovnik (2006) indiquent que l'utilisation des systèmes Product Data Management (PDM) était initialement limitée aux départements techniques, pour le stockage et l'accès aux fichiers générés par les processus de conception assistée par ordinateur. Le système PDM est ensuite devenu un outil de gestion des informations sur les produits tout au long de leur cycle de vie. Le PDM est aujourd'hui devenu un pilier du PLM.

Niknam, Huang, & Ovtcharova (2014) ont analysé et discuté la faisabilité du développement d'un système d'aide à la décision (*Decision Support System (DSS)*) pour soutenir l'ECM. Les auteurs ont proposé une architecture de haut niveau d'un éventuel système d'aide à la prise de décision dans le processus ECM. Le concept proposé est capable d'utiliser les données historiques pour résoudre les problèmes actuels, de stocker et de réutiliser une grande quantité de connaissances provenant de différents experts, de personnaliser l'analyse en fonction des objectifs stratégiques de l'organisation et de mettre à jour les connaissances en utilisant le module d'auto-apprentissage. Cependant, le concept proposé dans cet article reste limité une proposition théorique.

Ahmad, Wynn, & Clarkson (2014) ont présenté et évalué une méthode de représentation des informations relatives au processus de conception qui peut être utilisée pour estimer l'impact

du changement sur le processus de conception. Une approche en couches était adoptée pour structurer l'information requise pour gérer un processus de changement. Chaque couche est en soi un dépôt de données pour les informations décrivant l'un des quatre domaines du processus de conception. Les couches contiennent également des liens en leur sein et vers d'autres couches. Les informations sont structurées en quatre couches différentes : 1) la couche des exigences ; 2) la couche fonctionnelle ; 3) la couche des composants ; et 4) la couche du processus de conception détaillée.

1.3.3.2 Product Data Management

Les systèmes de gestion des données de produits (PDM) ont été introduits au début des années 1980, lorsque les concepteurs avaient besoin d'organiser leurs dessins électroniques et leurs fiches techniques. Au milieu des années 1990, le PDM occupait une place importante dans l'ingénierie et les ingénieurs ont commencé à y ajouter des systèmes de soutien (Picht, 2021). Bien que le système PDM ait déjà plus de 30 ans, il est toujours considéré comme l'un des systèmes les plus importants dans les entreprises actuelles (Peltokoski, Lohtander, & Varis, 2012). Le PDM est présenté comme un outil qui aide les ingénieurs et autres à gérer les données et le processus de développement des produits. Les systèmes PDM servent à gérer les quantités massives de données et d'informations nécessaires à la conception, à la fabrication, puis au support et à la maintenance des produits (Philpotts, 1996).

CIMdata (1997) définit les systèmes PDM comme "des solutions et des méthodologies utilisées dans une entreprise pour : 1) organiser, accéder et contrôler les données relatives à ses produits, et 2) gérer le cycle de vie de ces produits."

Le PDM peut aider les entreprises de chaque segment industriel qui conçoit et fabrique des produits, y compris par exemple l'aérospatiale, l'automobile, les produits électriques et électroniques, les industries de la défense, la production d'énergie, les consultants en conception et en gestion, et les entreprises de construction (Philpotts, 1996).

Une solution PDM unique peut être utilisée avec des programmes de la conception assistée par ordinateur (CAO), de la fabrication assistée par ordinateur (FAO), de l'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) et d'autres logiciels, ainsi qu'avec des systèmes traditionnels non informatiques qui génèrent ou utilisent des données sur les produits, comme les documents papier. Elle maintient également les relations entre les éléments de données produits, établit des règles qui décrivent et gèrent les flux de données et les processus, et fournit des notifications et des fonctions de messagerie (CIMdata, 1997). En outre, les systèmes PDM permettent aux utilisateurs et aux applications de relier les données de définition du produit aux pièces et aux structures du produit, tels que les dessins, les documents et les gammes de fabrication. Cela permet aux utilisateurs de déterminer quelles données seront affectées par les changements (Philpotts, 1996).

Dans le système PDM, les données sont stockées dans une armoire électronique (également appelée référentiel de données (Philpotts, 1996) ou entrepôt d'informations (Stark, 2015)). L'armoire électronique est un système de stockage de données qui entrepose et gère l'accès aux données. Philpotts (1996) définit deux types de données stockées :

- Les données de produit : comprennent les spécifications, les modèles de CAO, les données d'IAO, les dossiers de maintenance et les manuels d'utilisation.
- Les métadonnées : présentent les informations qui ont permis aux utilisateurs d'accéder aux données produites (c'est-à-dire la date de création, le numéro de révision, etc.). Les métadonnées sont maintenues dans une base de données PDM et supportent les fonctions du système PDM.

Le système PDM offre différentes fonctionnalités qui peuvent être classées en fonctions utilisateur et fonctions utilitaires (CIMdata, 1997; Mesihovic et al., 2004).

- Fonctions utilisateur : elles permettent à l'utilisateur d'accéder au système PDM. Différents utilisateurs peuvent être en mesure d'utiliser différents sous-ensembles de ces fonctions. Un utilisateur peut être soit un consommateur (consultation de données), soit un producteur (création de données). Les fonctions utilisateur sont divisées en cinq catégories principales :

- Armoire électronique et gestion des documents : pour le stockage et la récupération des informations sur les produits.
 - Gestion du flux de travail et des processus : méthodes de traitement des données sur les produits et mécanisme d'utilisation des données pour piloter une entreprise.
 - Gestion de la structure des produits : traitement des nomenclatures, des configurations de produits et des variantes.
 - Gestion des pièces : fournis des informations sur les composants communs et permet de réutiliser les conceptions.
 - Gestion des programmes : fournir des structures de répartition du travail et permettre la coordination entre les processus liés aux produits, la planification des ressources et le suivi des projets.
- Fonctions utilitaires : elles servent de passerelle entre les différents environnements d'exploitation et aident l'utilisateur à comprendre leurs complexités. Les fonctions utilitaires peuvent être divisées en cinq catégories :
 - Communication et notification : Le partage d'informations et les notifications d'événements sont facilités par des fonctionnalités telles que les liaisons par courriel.
 - Transfert de données : déplacement et suivi des données d'un emplacement ou d'une application à une autre.
 - Services d'image : stockage, accès, visualisation et balisage des informations sur les produits.
 - Administration du système : contrôle du système et surveillance du fonctionnement et de la sécurité.

1.4 Synthèse

Sur la base de la revue de littérature, on arrive à établir une bonne compréhension du contexte de gestion des modifications de conception dans l'industrie de construction et de gestion des modifications d'ingénierie dans l'industrie manufacturière. Les modifications sont

omniprésentes dans les deux environnements et peuvent impacter le coût et l'échéancier des projets.

La littérature montre que plusieurs processus ont été proposés pour bien gérer les modifications de conception/d'ingénierie dans les deux environnements. Malgré l'adoption de différents vocabulaires pour chaque industrie, les activités de ces processus demeurent comparables. De même pour les outils utilisés pour gérer les modifications de conception/d'ingénierie, on trouve que les chercheurs s'intéressent à proposer des outils qui aident à évaluer un changement donné et à déterminer ses impacts potentiels. La comparaison entre le BIM et le PLM du point de vue de gestion des modifications peut aider à transposer les bonnes pratiques de chaque environnement à travers une pollinisation croisée. Cependant, ce point de vue n'est pas encore évoqué par la littérature scientifique. Étant donné le rôle important joué par les outils informatiques pour bien gérer les modifications, cette étude traite la problématique d'identifier les fonctionnalités des outils de gestion des modifications techniques qui peuvent être transposées de l'environnement PLM vers l'environnement BIM.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Le présent chapitre a pour but de présenter les objectifs ainsi que la démarche adoptée durant cette étude pour répondre à la problématique définie dans la section 1.4. Tout d'abord, les objectifs spécifiques de notre étude seront décrits. Ensuite, la méthodologie qui permettra d'atteindre ces objectifs sera présentée.

2.1 Objectifs de recherche

2.1.1 Objectif général

Cette étude porte sur la comparaison des outils informatiques utilisés pour gérer les documents chez les industries soutenues par le BIM et les industries soutenues par le PLM durant les processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie. L'objectif de cette étude est d'identifier des opportunités d'amélioration des outils informatiques utilisés par les industries soutenues par le BIM et les industries soutenues par le PLM durant les processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie. Ce travail s'intéresse donc aux outils informatiques adoptés par les deux environnements (construction et fabrication) pour gérer leurs modifications.

2.1.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre notre objectif général, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier, explorer et décrire les outils adoptés pour la gestion des modifications de conceptions chez les industriels soutenus par le BIM.
- Identifier, explorer et décrire les outils adoptés pour la gestion des modifications d'ingénierie chez les industriels soutenus par le PLM.

- Identifier et décrire les similitudes et les différences entre les fonctionnalités des outils identifiés chez ces industriels.

2.2 Méthodologie et approche de recherche

Ce mémoire présente une recherche qualitative qui vise à comparer les fonctionnalités des outils informatiques adoptés par les industries soutenues par le BIM et les industries soutenues par le PLM pour la gestion des modifications de conception/d'ingénierie à travers quatre études de cas. La démarche adoptée durant cette étude comporte principalement trois étapes (Figure 2.1) : Le collecte des données, la cartographie des processus, et la comparaison des fonctionnalités des outils.

2.2.1 Collecte des données

Les données sont recueillies à partir de quatre projets identifiés dans les industries de la construction, de l'énergie, et de l'aéronautique. Le choix des partenaires industriels a pris en considération la présence d'un processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie, l'adoption des outils BIM ou bien PLM, la volonté des partenaires de collaborer avec nous dans un projet de recherche, et aussi la possibilité de contacter les professionnels impliqués dans le processus de gestion des modifications techniques.

Le premier partenaire industriel est une entreprise de construction canadienne de Montréal qui offre des services de gestion de projets de construction. Le deuxième partenaire industriel est une entreprise de construction française offrant des services de génie civil, de fondation, d'énergie et d'aménagement. Les deux partenaires du côté construction adoptent des outils BIM et sont donc considérés comme des industries soutenues par le BIM. Notre troisième partenaire industriel est une entreprise offrant des services dans le secteur de l'énergie et qui adopte des outils BIM ainsi que des outils PLM. Enfin, notre dernier partenaire industriel est un leader mondial de l'industrie aérospatiale qui adopte des outils PLM pour gérer ces produits.

Pour des raisons de confidentialité, nos quatre partenaires industriels seront anonymisés et seront désignés respectivement comme Entreprise A, Entreprise B, Entreprise C et Entreprise D. La collecte des données a été réalisée grâce à un total de 22 entretiens semi-structurés avec des personnes occupant des postes clés liés aux processus de gestion des modifications techniques de nos partenaires industriels. Dans l'approche semi-structurée, une série de questions est préparée pour guider l'entretien, mais la personne interrogée a une grande liberté de réponse. Il est donc possible de ne pas répondre aux questions dans l'ordre indiqué sur le planning. Au fur et à mesure que le chercheur remarque des éléments exprimés par les personnes interrogées, des questions ne figurant pas dans le schéma peuvent être posées. La durée moyenne des entretiens a été de 1 heure et 30 minutes. En outre, les documents relatifs aux projets ont été analysés en profondeur pour comprendre le flux de documents pendant le processus de changement des modifications techniques. Les documents présentent principalement les communications documentées comme les e-mails, les contrats, les descriptions de projet, les ordres et les demandes de modification.

2.2.2 Cartographie des processus

Selon Stark (2015), le terme cartographie des processus est souvent utilisé pour décrire l'activité consistant à documenter un processus existant. Le résultat de cette activité est aussi parfois appelé cartographie des processus d'entreprise, ou diagramme des processus, ou diagramme des flux de processus. L'une des raisons de documenter un processus existant est de faire en sorte que toutes les parties prenantes s'entendent sur ce qui se passe dans un processus particulier.

Le processus de gestion des modifications de conception/ingénierie de chaque entreprise a été cartographié en utilisant le format BPMN 2.0. Le format Business Process Modeling Notation 2.0 (BPMN 2.0) a été choisi pour modéliser ces processus. BPMN est une représentation graphique de la logique des étapes d'un processus métier. Cette notation a été explicitement créée pour organiser la séquence des événements et des messages échangés par les participants

à diverses activités. Ce format nous a permis de représenter les activités, les documents, le flux d'informations et les outils utilisés dans chaque processus.

Les processus ont été ensuite validés par nos partenaires industriels durant les entrevues semi-dirigées.

2.2.3 Comparaison

Quatre outils commerciaux utilisés pour la gestion des documents ont été identifiés et explorés par les auteurs. Dans notre exploration, nous nous sommes appuyés sur la documentation offerte par nos partenaires industriels qui décrivent leurs pratiques et la documentation des éditeurs de ces outils. Les fonctionnalités offertes par chaque outil ont ensuite été identifiées et décrites. Ensuite, une comparaison détaillée entre les différentes fonctionnalités a été effectuée afin d'identifier les similitudes et les différences.

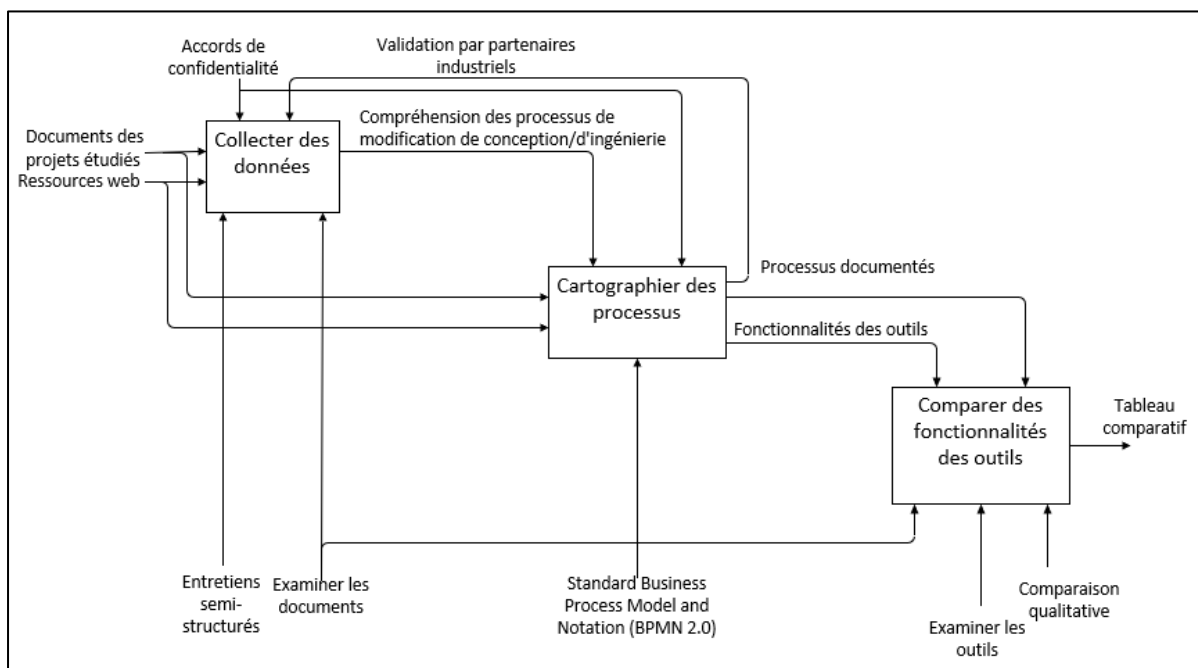


Figure 2.1 La démarche de recherche adoptée

Le chapitre suivant présente l'article intitulé *Comparison of IT tools for Design/Engineering Change Management between BIM- and PLM- supported industries*. Le travail décrit tout d'abord les processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie chez quatre partenaires industriels qui viennent de l'univers de la construction, de l'énergie, et l'aéronautique. Ensuite, le travail identifie et compare les fonctionnalités des outils informatiques adoptés durant le processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie chez les partenaires industriels.

CHAPITRE 3

COMPARISON OF IT TOOLS FOR DESIGN/ENGINEERING CHANGE MANAGEMENT BETWEEN BIM- AND PLM- SUPPORTED INDUSTRIES

Oussama Ghnaya ^{a,b}, Hamidreza Pourzareh ^{a,b}, Louis Rivest ^b, Conrad Boton ^a

^a Department of construction engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b Department of system engineering, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article de journal soumis pour publication au « Computers in Industry », soumis le 28 Novembre 2022

Abstract

BIM and PLM are two 3D-based holistic approaches supporting the construction and manufacturing industries, respectively. The comparison between BIM and PLM has recently been brought to the attention of different research studies which mention that comparison can improve both approaches through cross-pollination. Different standpoints had been chosen to compare these approaches. This paper compares the functionalities offered by the document management tools adopted by BIM- and PLM- supported industries during a Design/Engineering Change Management (D/ECM) process. Four case studies with partners from both industries are presented in this paper. First, the industrial partners' D/ECM processes are presented. Second, the adopted tools used to control documents are identified and explored. Finally, the functionalities offered by these tools are compared showing their main similarities and differences. This study shows that PLM tools presented in the case studies offers some advanced functionalities especially related to revision management, impact analysis and workflow management.

Keywords: Design Change Management; Engineering Change Management; Building Information Modeling; Product Lifecycle Management; Document management; Tool; Process; Comparison

3.1 Introduction

In the past decade, Building Information Modeling (BIM) has been introduced to the construction industry as a business approach based on 3D models that can lead to improvements in productivity (Eadie et al., 2013). Indeed, BIM is described as one of the most promising approaches to achieve digitalization in the construction industry over the whole building lifecycle (Krämer & Besenyői, 2018). The trend towards digitalization in the construction industry came a bit late compared to other industries like automotive and aeronautic, where Product Lifecycle Management (PLM) has been established since the 90 (Stark, 2015). BIM and PLM have several similarities regarding data sharing, project management, team organization around deliverables and timeframes, and object-based visualization activities (Jupp & Nepal, 2014). However, BIM and PLM also differ in terms of the tools, workflows, and standards defined to achieve each approach (Boton et al., 2016). BIM provides great functionality for managing different building processes from design through construction, but it lacks a monitoring and management mechanism (Cheutet et al., 2018). On the other hand, PLM provides powerful management capabilities for the whole lifecycle of any constructed project (Cheutet et al., 2018). A comparison of BIM and PLM can be helpful in improving the two worlds through cross-pollination (Pourzareh et al., 2020).

Recently, many research studies have focused on comparing BIM and PLM from different standpoints. (Jupp & Nepal, 2014) compared the impact of BIM and PLM on the traditional practices of construction and manufacturing industries. Botton et al. (2016) and Botton et al. (2018) provided a comparison between BIM and PLM from the standpoint of Product Structure (PS) and the Bill of Material (BOM). Di Biccari et al. (2018) examined whether the concept of a "configuration" view, or more accurately, "product structure configuration" of complex manufacturing, has been applied to process or information management for different phases of the AEC industry's lifecycle.

Among the processes that exist in both BIM- and PLM- supported industries, the process that manages changes made to released documents is an important one. These changes are known

as design changes in the construction industry and as engineering changes in the manufacturing industry. According to Jarratt et al. (2011), an engineering change can be handled and understood from various perspectives. The main categories are process, tool, and product perspectives. Different research studies proposed various processes and tools to manage design changes in the construction industry (Hao et al., 2008; Ibbs et al., 2001; Motawa et al., 2007; Mejlænder-Larsen, 2017) and engineering changes in the manufacturing industries (Dale, 1982; Huang & Johnstone, 1995; Riviere et al., 2003; Maurino, 1993; Maull et al., 1992; Quintana et al., 2012).

During the Design/Engineering Change Management (D/ECM) processes, a new revision of a document is released after a proposed change is approved. The document revisions must be managed to ensure that the right person gets the correct revision at the right time. A document, in the context of technical data management, can be defined as a coherent set of information aimed at describing a technical object (Maurino, 1993). According to the IEC 824045-1 standard (IEC, 2001), the document concept covers not only traditional paper-based documents, but also computer-based information that is handled as a unit (a closed container of information). The tools adopted by BIM- and PLM- supported industries to manage documents offer various functionalities that can be exploited during a D/ECM process.

This chapter is a part of a research study where the authors compare the BIM- and the PLM- industries from the standpoint of D/ECM. We focus in this paper on comparing the functionalities of document management tools adopted to support the D/ECM processes. Data has been collected through from four industrial partners which include two BIM-supported companies, one PLM-supported company from the aeronautic industry, and one BIM/PLM-supported industry. A series of semi-structured interviews have been held with the industrial partners to map their D/ECM process and to identify their document management tools. Next, the functionalities of these tools have been investigated and compared.

This research helps in highlighting the similarities and differences between document management tools adopted in BIM- and PLM-supported industries and opens the gate for potential improvements.

The chapter is organized into six main parts. Section 3.2 proposes a review of the recent related works. Section 3.3 presents the research methodology adopted during this study. Section 3.4 shows the cases studies, focusing on the presentation and comparison of tools' functionalities. The results are discussed in section 3.5. The work is concluded in section 3.6.

3.2 Background concepts and literature

This section presents the D/ECM context in the construction industry supported by BIM tools and discrete manufacturing industry supported by PLM tools. This article describes these industries by the terms BIM-supported and PLM-supported industries, respectively.

3.2.1 Design Change Management in the BIM-supported industry

This section presents the general context of design change management in the construction industry and shows a design change process proposed from the literature. Then, it highlights some BIM tools' applications suggested from the literature during a design change management process.

3.2.1.1 Design Change Management in the BIM-supported industry

Design changes are frequent in construction projects and can occur from various sources, for multiple reasons, at any stage of the project (Hao et al., 2008). A design change is defined as any change to the design or the construction of a project after the contract is awarded and signed (Hao et al., 2008). It may occur in architectural, structural, plumbing and drainage, site works, or other aspects of construction (Alwi et al., 2002). Design changes can significantly impact a project's cost and schedule overruns (Moayeri et al., 2017). Furthermore, design changes are considered one of the significant causes of project failure (Dale, 1982).

Design changes must be managed through a well-structured change management process to avoid contract disputes between the stakeholders (Hao et al., 2008). However, it is essential to emphasize that there is no unique change management process for the design change in the construction industry. From the literature, we find that different design change management processes have been proposed to take control of design change and information workflow (Hao et al., 2008; Ibbs et al., 2001; Motawa et al., 2007; Mejlænder-Larsen, 2017).

To give an instance, Hao et al. (2008) offered a basic design change process model with five phases in a sequence order:

- **Identify changes:** a set of rules has been defined to identify changes throughout the life cycle of a construction project.
- **Evaluate and propose changes:** determine the cost and time impacts of the change on the other processes and teams. At this phase, a proposal change order (PCO) summarises the change, and its consequences is produced.
- **Approve changes:** each identified change must go through a formal approval process. These processes are predefined depending on the type of changes and construction contracts. In addition, the change approval process must be approved by the professionals involved in the change process and the client.
- **Implement changes:** change implementation refers to the management and coordination of information, documents, designs/drawings, and records concerning the changes and their consequences. During this phase, an operational system is required to ensure that all aspects are updated, all parties are notified, and all activities are completed correctly and well documented.
- **Analyze changes:** The data collected during the change implementation is used to evaluate the change analysis and system performance.

3.2.1.2 BIM in design change management

Adopting BIM in the construction industry helps reduce design changes but not eliminate them (Eastman et al., 2011). Buildings models must be revisioned to ensure consistency of distribution models, deal with changing information, make monitoring changes more manageable, and facilitate retracing change history (Koch & Firmenich, 2011).

Several research studies have proposed some tools to deal with design changes. Nour et al., (2006) recommended using object line number identifiers and Industry Foundation Classes Globally Unique Identifier (IFC GUIDs) to create a database for labeling revisions of the design model. Yet, the existing IFC standard does not allow for the exchange of modifications between various BIM models or for tracking previous changes' history (JalyZada et al., 2014). Moayeri et al. (2017) created an add-in model checker that uses a component-to-component (ID-to-ID) comparison to identify altered elements in BIM models.

Juszczuk et al. (2016) has developed automated BIM tools that support design change management and allow load and compare two or more IFC format revisions; visualize changes by highlighting altered components and their attributes, and analyze change impacts on costs. Likhitrungsilp et al. (2018) has proposed a system consisting of several integrated tools (Revit, dynamo, excel, VBA). It allows the comparison between BIM models and highlights changes via color-coded 3D visualization. The comparison results can be used in estimating cost and schedule impacts.

The listed studies show how BIM tools can visualize and track design change management. The focus of the previous studies was on using either developed tools or a combination of BIM tools to determine the impacts of the design changes on the schedules and cost of the construction projects. Yet, less studies focus on describing the functionalities offered by BIM tools to manage documents during a design change management process.

3.2.2 Engineering Change Management in PLM-supported industry

This section offers an overview of ECM in the PLM-supported industry by presenting several proposed engineering change management processes. In addition, this section highlights the role played by the Product Data Management (PDM) systems during an engineering change management process.

3.2.2.1 Engineering Change Management in the PLM-supported industry

The PLM-supported industry is characterized by the variety and constant evolution of its products. Different departments are involved in designing and producing products that fulfill the clients' requirements. Engineering changes have been defined by (Jarratt, Clarkson, & Eckert, 2005) as "an alteration made to parts, drawing or software that have already been released during the product design process. The change can be of any size or type; the change can involve any number of people and take any length of time". Engineering changes occur throughout the entire life cycle of a product, from the time a concept is selected to when the product goes out of service (Jarratt et al., 2011).

To control any changes that may be raised, companies adopt Engineering Change Management (ECM) processes and systems. The Engineering Change Management process is considered as an excellent example of a business process in the PLM environment. It helps in modifying products in a controlled manner (Stark, 2020).

There is no international standard ECM process that companies can follow. Each company has to create and implement its process (Stark, 2020). However, some standards can be adopted as guidance in documents, such as:

- ISO 9001: 2008, « Quality management systems- Requirements."
- ISO 10007, "Quality management systems- Guidelines for configuration management."

According to Stark (2015), it is necessary to model the ECM process. It is essential to define the numerous steps, reviewers, approvers, and sign-off procedures. If an activity does not occur, the definition should specify hierarchies so that it is automatically handed to the subsequent highest authority.

From the literature, we find that several engineering change processes are proposed. Different authors divide the engineering change process into various phases:

- Dale (1982) – (i) procedure to approval; (ii) procedure on approval.
- Huang & Johnstone (1995) – (i) before approval; (ii) during approval; (iii) after approval.
- Riviere et al. (2003) – (i) engineering change proposal; (ii) engineering change investigation; (iii) engineering change embodiment.
- Maurino (1993) – (i) request; (ii) instruction; (iii) execution; (iv) application.
- Maull et al. (1992) – (i) filtration of engineering change proposals; (ii) development of a solution to the proposal; (iii) assessment of impact of solution; (iv) authorization of change; (v) release and implementation of change.

For instance, the four phases proposed by Maurino (1993) for the engineering change process are described below:

- **Request** (Engineering Change Request – ECR): In this phase, an engineering change request is raised to report on a problem.
- **Instruction** (Engineering Change Proposal - ECP): The request is analyzed and potential solutions are proposed. One of the proposed solutions will be adopted by a Change Board composed of various stakeholders.
- **Execution** (Engineering Change Order - ECO): In this phase, the selected solution is implemented by updating the impacted documents.
- **Application** (Engineering Change Notice - ECN): The applicability of the ECO is evaluated so as to determine at what moment or to which units the new product definition will apply, and appropriate communications are launched.

3.2.2.2 Product Data Management (PDM) in engineering change management

A fundamental pillar of PLM platforms is the PDM system (Stark, 2020). The main role of the PDM system is to manage product data. It can handle all product data produced and consumed throughout the product lifecycle. It can deliver the appropriate information at the right moment (Stark, 2015).

The PDM systems play a crucial role in the engineering change management processes. The workflow and process management functionality helps define and control changes made to the product configurations, part definitions, product data, data relationships, and parts revisions or variants (Stark, 2020). Companies adopting PDM found that it can help reduce the engineering change time by 30% and the number of engineering changes by 40% (Stark, 2015).

In the PDM system, data are stored in an electronic vault (also named data repository (Philpotts, 1996) or Information Warehouse (Stark, 2020)). The vault is a data storage system that stores and manages access to data. (Philpotts, 1996) defines two types of stored data:

- Product data: includes specifications, CAD models, CAD data, maintenance records, and operating manuals.
- Meta-data: presents information allowing users to access product data (i.e., date of creation, revision number, etc.). Meta-data is maintained in a PDM database and supports the PDM system's functions.

The PDM system offers different functionalities that can be classified into User and Utility functions (CIMdata, 1997) (Mesihovic, Malmqvist, & Pikosz, 2004).

- User functions: give access to the PDM system to the user. Different users may be able to use different subsets of these functions. A user can be either a consumer (viewing data) or a producer (creating data). The user functions are divided into five main categories:
 - Data vault and document management: for storing and retrieving product information.

- Workflow and process management: methods for handling product data and offering a mechanism for using data to drive a business.
 - Product structure management: handling of bills of materials, product configurations, and associated revision and design variants.
 - Parts management: provides information on common components and allowing designs to be reused.
 - Program management: proving work breakdown structures and enabling coordination between product-related processes, resource scheduling, and project tracking.
- Utility functions: serve as a bridge between different operating environments and help the user understand their complexities. The Utility functions can be divided into five categories:
 - Communication and notification: Information sharing and event notifications are facilitated by features such as e-mail linkages.
 - Data transport: moving and tracking the data from one location or application to another.
 - Data translation: exchanging files in the proper format.
 - Image services: storage, access, viewing, and mark-up of product information.
 - System administration: controlling system and monitoring of operation and security.

The section above has provided an overview of ECM in the PLM-supported industry by presenting the different processes proposed in the literature to manage engineering changes. Since the PDM presents the core of PLM platforms in managing data, we listed the different functionalities a PDM system can offer to manage engineering changes. Further in this article, we will examine the real role played by a PDM system in an actual ECM process.

3.2.3 Summary

The literature review presented above offers an overview about D/ECM in the BIM- and PLM-supported industries by presenting the proposed process to manage engineering/design change in each industry. We observe that despite the differences of the vocabulary used in each industry, the activities of the D/ECM process phases remain similar. In this article, we will adopt the ECM phases mentioned by Maurino (1993) to classify the D/ECM activities of our industrial partners.

The goal of this study is to identify and compare the functionalities of the tools adopted for managing documents during the D/ECM processes in the BIM- and PLM- industries. The similarities and differences identified during this comparison can lead to potential cross-pollination between the two industries.

3.3 Methodology

This thesis compares the functionalities offered by document management tools adopted by BIM- and PLM-supported industries to support their D/ECM process. The selected approach was to work from the D/ECM process as implemented in actual projects, representing a sample of current real-world practices. The research methodology thus includes three main phases: Collect data, Mapping D/ECM processes, and Compare tools functionalities (Figure 3.1).

First, data was therefore gathered from four industrial partners from the construction and aeronautic industries. The first industrial partner (A) is a Canadian construction company in Montreal and provides services for managing construction projects. The second industrial partner (B) is a French construction company offering civil engineering, foundation, energy, and development services. The third industrial partner (C) is an energy services company. The fourth industrial partner (D) is a global leader in the aerospace industry. For confidentiality reasons, the four industrial partners are anonymized in this paper. Industrial partners were selected based on different criteria that mainly considered the capability to contact top-level

management and the availability of a design change management responsible. These criteria facilitated our access to data.

Data collection has been conducted with 22 semi-structured interviews with interviewees in key positions related to our industrial partners' D/ECM processes. In the semi-structured approach, a set of questions are prepared to guide the interview, but the interviewee has a lot of freedom in responding. In other words, questions may not be answered in the order listed on the schedule. As the interviewer notices items expressed by interviewees, questions not contained in the outline may be asked. During these interviews we asked our partner to describe their D/ECM processes. Since a partner may deal with a different D/ECM process from one project to another, we asked them to describe the different phases of a D/ECM process from a specific but representative project. The average length of the interviews was 1 hour and 30 minutes.

In the second phase, each partner's D/ECM process has been mapped. The Business Process Modeling Notation 2.0 (BPMN 2.0) format has been chosen to model the D/ECM processes. BPMN is a graphical representation of business process steps' logic. This notation was explicitly created to organize the sequence of procedures and messages that pass between the stakeholders in various activities (BPMN, 2022). This format allowed us to depict the activities, the documents, the information flow, and the tools used in each process. In addition, when available, sample documents provided by partners have been analyzed to further understand the process. They documented communication like e-mails, contracts, project descriptions, change orders, and requests. During this step, tools used by partners for controlling documents have been identified. The documentation phase was iterative and reached an end with the approval of its BPMN by each industrial partner.

Finally, the functionalities provided by the document management tools were analyzed. The authors explored the tools directly by using the tools if available. Otherwise, the authors rely more on the documents offered by the industrial partners to describe the tasks conducted with these tools. This helped depict the role document management tools played during the D/ECM.

The exploration leads us to identify the key functionalities used in the D/ECM. Then a detailed comparison between each functionality was conducted to identify similarities and differences by using a descriptive summary table.

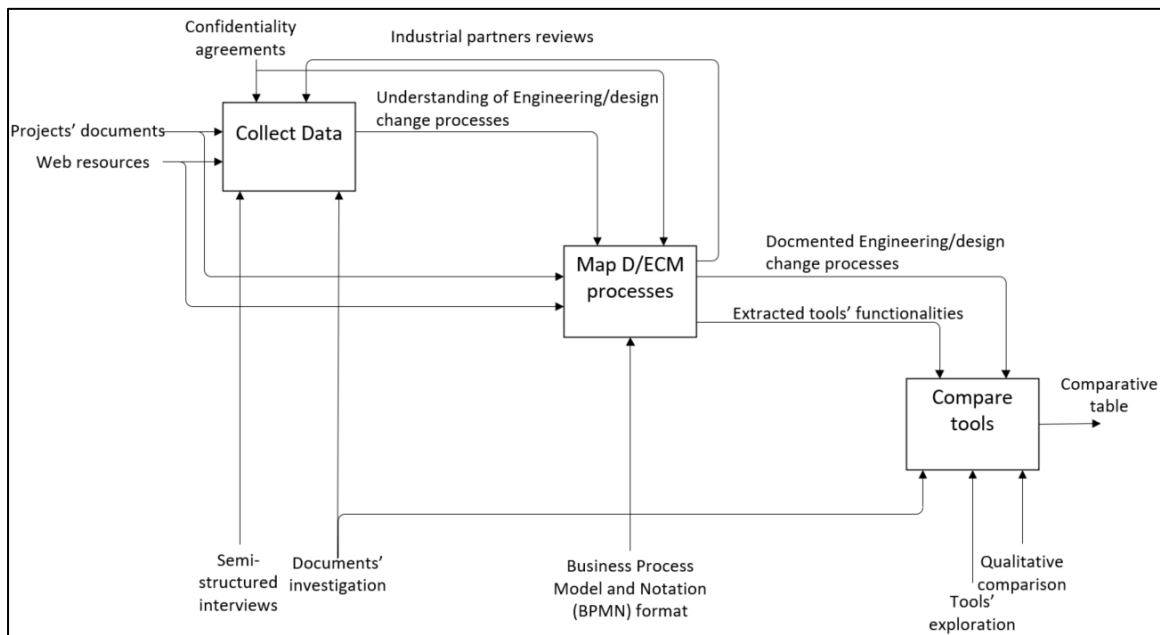


Figure 3.1 Research methodology

3.4 Case study

3.4.1 Presentation of the industrial partners

Partner A is a Canadian company located in Montreal, Quebec, Canada, that provides several services for managing construction projects. A private project was selected. It corresponds to the construction of a building phase that will include 250 rental apartments spread over 20 floors in Montreal. During the study, the project was at 90% completion. The project involves different stakeholders collaborating to ensure the project's progress. They are: the Client, the Project Manager, the Professionals, the General Contractor, and the Subcontractor. Our partner plays the role of the project manager in this project. Although design changes cost over 15 million CAD in the studied project, no formally documented DCM process was available.

Partner B is a French construction company specializing in public works, civil engineering and foundations, energy and development, as well as real estate and concessions. The project documented in this study is a private construction project based in France. The design change process that has been documented during this study presents a general design change process where our industrial partner plays the role of the general contractor. The stakeholders in this process are: the Client, the Project Manager, the General Contractor, and the subcontractors. Partner C is an energy services company based in Canada. The D/ECM process documented during this research reflects the process managed within the company departments with the external partner(s). Their internal departments include Engineering Administration, Contract Administration, "Planning, Estimation, and Cost Control." The external partner is presented by the Contractor and Sub-contractors if needed.

Partner D presents our industrial partner for the PLM side. It is a Canada-based aerospace manufacturer that adopted a paperless ECM process in 2016. For confidentiality reasons, the authors did not have access to the full ECM process documentation. Hence, a series of interviews have been held with the configuration and design departments to document the ECM process, as for the other partners.

3.4.2 D/ECM Process

In this section, we present the D/ECM processes adopted by our industrial partners. For confidentiality reasons, the BPMNs mapped during this study will not appear in this thesis. Instead, we provide a description of the activities of each D/ECM process. The four ECM phases proposed by Maurino (1993) are adopted to cluster these activities due to their similarities, as revealed by the D/ECM processes as documented with the four partners. The term ECR, ECP, ECO, and ECN are replaced by D/ECR, D/ECP, D/ECO, and D/ECN in order to include the construction terminology in the process' phases.

An example of the D/ECM processes is presented in ANNEXE II.

Table 3.1 D/ECM process' phases for the industrial partners

D/ECM phase	Partner A	Partner B	Partner C	Partner D
D/ECR (Request)	<ul style="list-style-type: none"> • A DCR is initiated by the client or after raising an RFI by the contractor or the sub-contractors. • The project manager communicates the DCR to the professionals. • The project manager follows up the DCRs. 	<ul style="list-style-type: none"> • A DCR is initiated by the client or after raising an RFI by the general contractor. • The DCR is communicated to the professionals. 	<ul style="list-style-type: none"> • An ECR is initiated. • The ECR must be indicated in the internal system with a clear description. 	<ul style="list-style-type: none"> • An ECR is initiated. • A budget is assigned to the raised ECR.
D/ECP (Instruction)	<ul style="list-style-type: none"> • The DCR is evaluated by the professionals. • Professionals propose different Change Directives (CDs) to resolve the ECR. • One of the CD is approved by the professionals. • The project manager follows up the CDs. 	<ul style="list-style-type: none"> • The DCR is evaluated by the professionals. • The professionals provide a list of instructions to be shared with the client. • The client evaluates and approves the instructions. 	<ul style="list-style-type: none"> • The initiator proposes a solution to resolve the ECR. • The ECR and the solution proposed are evaluated by the contract administration in parallel with the engineering department, design department, and planning department to determine the impact of the change on the schedule and cost of the project. • The evaluation is sent to the contract department to approve the change and the proposal. 	<ul style="list-style-type: none"> • The design manager receives and evaluates the ECR. • The design manager prepares an Integrated Product Team (IPT), formed of professionals, to take charge of the change. • The IPT creates a Design Intent Document (DID) that includes the ECR and the change proposals. • The proposals go through a series of reviews and then get approved by the design manager and the IPT.
D/ECO (Execution)	<ul style="list-style-type: none"> • Documents are updated by the professionals based on the approved CD. 	<ul style="list-style-type: none"> • Documents are updated by the professionals based on the approved instructions. 	<ul style="list-style-type: none"> • The documents are updated to include the approved change. 	<ul style="list-style-type: none"> • The configuration management (CM) department create an ECO based on the DID.
D/ECN (Application)	<ul style="list-style-type: none"> • The updated documents are communicated to the contractor and subcontractors. • The contractor and subcontractors propose their bids to execute the change. • The client approves the bids. • The project Manager creates an amendment to include the modifications to the initial agreement. • The client approves the amendment. • The contractor and subcontractor execute the change under the supervision of the project manager and the professionals. 	<ul style="list-style-type: none"> • The updated documents are communicated to the contractor and subcontractors. • The contractor and subcontractor propose their bids to execute the change. • The bids are approved by the client and the professionals. • The client prepares a service order containing the final instruction and share it with the general contractor. • The general contractor executes the change. 	<ul style="list-style-type: none"> • The updated documents are shared with the stakeholders. • The change is executed by the contractor under the supervision of the contract department. 	<ul style="list-style-type: none"> • The CM department assign the ECO in Daily Issue List. • The change is implemented

Table 3.1 describes the activities of our four industrial partners during their D/ECM processes. The D/ECR phase, when a request is raised, seems similar to the four cases studied. However, the way of raising a D/ECR may be different. In fact, we found that in BIM-supported partners, the DCRs are usually initiated through email or phone, and the follow-up of the DCRs is generally done through an Excel sheet. On the other side, we find that our PLM-supported partner and our hybrid BIM/PLM-supported partner rely more on their internal configuration management to raise and manage ECRs. In the next section, we discuss the tools used for each partner in depth.

The D/ECP phase focuses on the evaluation of the D/ECR and the proposal of potential solutions to resolve the D/ECR. At the end of this phase, one solution has to be approved. The professionals do the proposal solution for partners A and B. Similarly; partner D creates a group of professionals named Integrated Product Team (IPT) to take charge of the ECP. Interestingly, for partner C, the ECR raiser usually takes charge of proposing a solution that our partner's internal departments evaluate. Another interesting point to mention in this phase is that the proposed solution for the BIM-supported partners includes updated documents, which is not the case for the other partners.

The D/ECO phase executes the selected solution by documenting the approved change proposal. The professionals update the documents that are involved in the approved changes. The D/ECN phase focuses on studying of the applicability of the D/ECO and the notification of the communication of the updated documents to the stakeholders involved. We can see that this phase seems to be more complicated on our BIM-supported partners' side. In fact, while partner D assigns a budget to the change since the D/ECR phase, the change cost is discussed at the D/ECN phase for the BIM-supported partners. At this stage, negotiations are held with the general contractor and the sub-contractors to agree on the cost and how to implement the change.

During the D/ECM process, different documents are exchanged and updated before being implemented. Managing these documents remains a crucial task for the effectiveness of the

D/ECM process. In the next section, we focus on identifying and comparing the functionalities of the document management tools adopted by each partner during his D/ECM process.

3.4.3 IT tools involved in Partners' D/ECM process

Various tools are used by our industrial partners to support their D/ECM processes. Table 3.2 lists these tools and classify them into Edition and Management tools. Whereas Autodesk products presents the dominant Edition tools for the construction partners, we find that Catia V5 from Dassault Systems is the tool used by the aeronautic partner. As a hybrid company, Partner C uses both Autodesk and Dassault Systems as Edition tools. For the management tools, we observe that Excel is present in all four partner companies. Excel remains an important tool for users to manage and track their documents. While companies A and B rely only on commercial tools to manage their data, we find that companies C and D use some in-house configuration management tools.

Table 3.2 Adopted tools in D/ECM process

Tools		Partner A	Partner B	Partner C	Partner D
Edition	AutoCAD	✓	✓	✓	
	Revit	✓	✓	✓	
	Civil 3D			✓	
	3D Max			✓	
	Catia V5			✓	✓
Management	Excel	✓	✓	✓	✓
	SmartUse	✓			
	BIM360 Team		✓		
	Smarteam			✓	
	3DExperience				✓
	In-house configuration management tool			✓	✓

During this research, we focus on presenting and comparing the functionalities of the document management tools adopted by our partners to manage documents during a D/ECM process. These tools are **SmartUse** for partner A, **BIM360 Team** for partner B, **Smarteam** for partner

C, and **3DExperience** for partner D. These tools are referred to as document management tools in this article. Studying other management tools functionalities such as Excel, and the In-house configuration tools is considered to be out of the scope of this study. The document management tools that are being compared in this article are presented as follow:

- SmartUse: Presents an electronic document management system that helps different stakeholders embedded in a construction project work collaboratively. By managing electronic documents, SmartUse helps implement a paperless culture in the construction industry (SmartUse, 2022).
- BIM360 Team: A cloud-based collaboration platform developed by Autodesk that enables architects, engineers, and stakeholders in their projects to work effectively together in a single central workspace. Over 100 2D and 3D file formats can be viewed, marked up, shared, and reviewed by users on any device (browser or mobile) (BIM 360 Team, 2020).
- Smarteam: A PDM system offered by Dassault Systems that provides collaborative offerings focused on product development processes, supporting design, engineering, and business activities. A unified platform for all SmarTeam products enables collaboration between users across these domains. Companies can tailor the solution to facilitate collaboration across global organizations or supply chains as needed (Enovia Smarteam, 2020).
- 3DExperience: A cloud-based collaborative environment developed by Dassault Systems. The platform is a connected online environment where all the design, collaboration, and data management capabilities are stored in a single user interface. 3DExperience is considered to be potential candidate to replace Smarteam (3DExperience, 2022).

3.4.4 Comparative analysis

3.4.4.1 Comparison approach

The authors have followed four main steps to compare the functionalities of the IT tools used by the industrial partners during a D/ECM process (Figure 3.2). First, the authors identified the document management tools adopted during the D/ECM. The identification was done through the semi-structured interviews and the documented BPMNs. That step ended up by identifying four tools which are presented in the previous section. Second, the functionalities offered by each tool and used during the D/ECM were identified. The authors relied on the interviews with the industrial partners and their documents to understand their practices. Third, the functionalities were explored based on the documentation offered by the tools' organizations on form of guides or webinars (literature). In order to get more details, the authors have assessed in meeting with some tools' publisher (like SmartUse) or tools expert user (like 3DExperience). SmartUse and 3DExperience were also used by the authors. However, it was not possible for the authors to use BIM360 Team and Smarteam since they are no more maintained by the organizations (Autodesk and Dassault systems, respectively). Finally, the comparison between the tools' functionalities is done function by function indicating their similarities and differences.

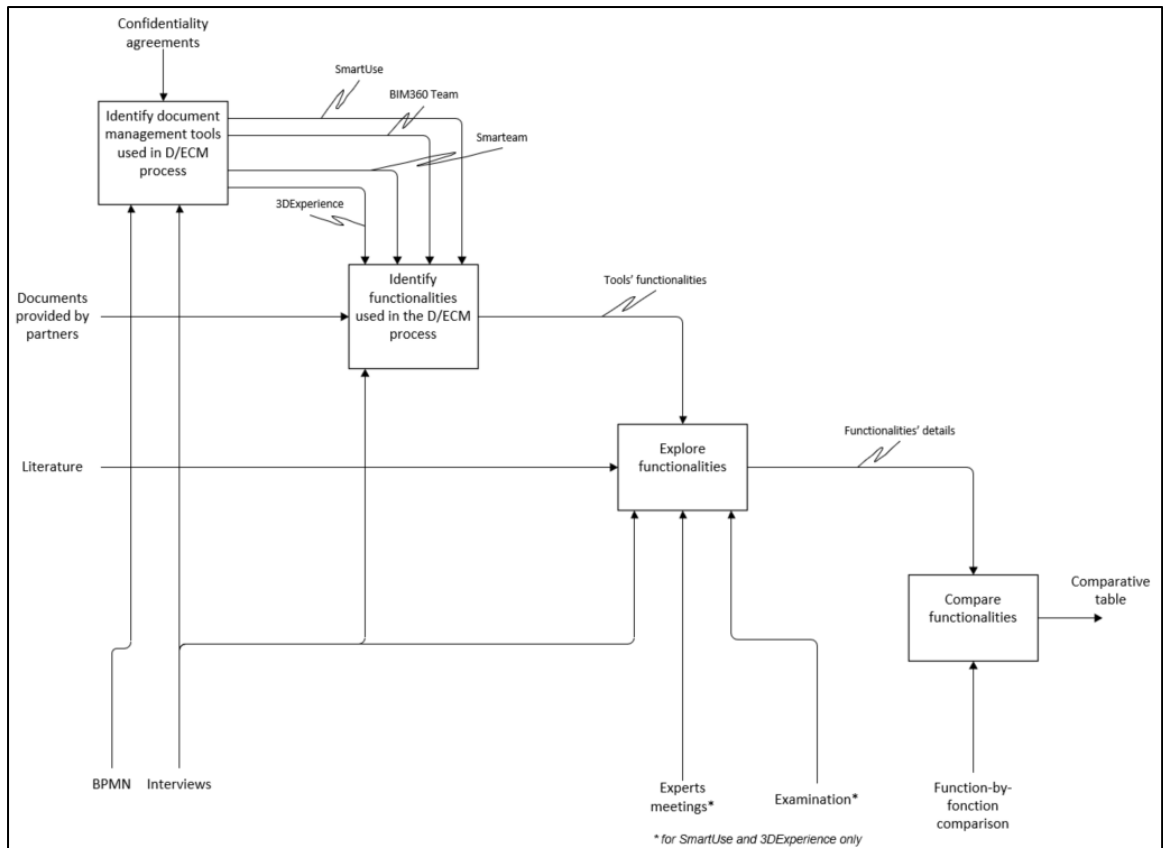


Figure 3.2 Approach for comparing IT Tools functionalities for a D/ECM process

3.4.4.2 Comparison results

Table 3.3 presents a comparative analysis of the tools' functionalities used by the industrial partners during a D/ECM process. The process can be initiated by any stakeholder and at any time. The issue management functionality offered by Smarteam, 3DExperience, and SmartUse allows users to raise, assign, and track their issues within the document management tool. It is essential to mention that some issues can be raised by email and tracked by an excel sheet in our Partner A practices. The BIM 360 Team users (Partner B) use the annotation functionality to communicate their issues directly on the documents and rely on Excel to track the issues.

The annotation functionality is available in the four studied tools to annotate and comment 2D documents using predefined shapes (i.e., circles, arrows, clouds, etc.) or freehand markups. BIM 360 Team, SmartUse, and 3DExperience users can also annotate 3D documents. The

viewing functionality helps the user visualize documents and the added annotation to evaluate the raised issues. It is also possible to navigate through models, take measures and create sections. BIM 360 Team and 3DExperience users do not require a native CAD tool to visualize the 3D models since they can be opened directly on a browser. Smarteam users, from their side, need to have the documents saved on their central vault to view them. The central vault presents the repository used to share documents. Documents can also be transferred to other users by email or hyperlink. The users of BIM360 Team and 3DExperience can share documents via communities that regroup different users. Documents can also be shared through accessible files.

The file management functionality is used to store and organize documents. The document can be classified into folders. As we have seen by some partners, documents can be classified by departments (Architectural, Mechanical, etc.) or by type (RFIs, Directives, Change orders, etc.) in a D/ECM context. The four studied document management tools show high similarity in managing files where users can create, edit, and arrange files. 3DExperience has the particularity of providing file status visibility. A file can be either Private (Content visible to members only), Public (Content visible to all users), or Protected (Content with maturity "Released" or "Obsolete" visible to all users). For the other tools, a file remains invisible until adding a user.

Adding users to files is controlled through the access management functionalities. Accesses are managed by assigning roles to users. Generally, the project manager takes charge of assigning roles to other users. Accesses are related to the assigned roles. Access management can be used while creating the Change Board to ensure only necessary users are added. A project Manager can promote or cancel a user role. For BIM 360 Team and 3DExperience, users can also request roles.

The studied tools offer some functionalities to help professionals analyze the impact of a proposed change. We can observe that the comparison feature is present in all of our studied tools. While SmartUse only compares 2D documents, the rest of the tools offer the possibility

to compare both 2D and 3D models. The comparison functionality is often helpful in comparing two revisions of the same drawing or model to observe the change that has been applied. Smarteam and 3DExperience offer another necessary functionality to track change propagation. Users of these two tools can display all the related documents to a selected document and the impacted revisions of that document to determine the potentially impacted documents in case of a change.

Once a change is implemented, a new revision of the change document must be released. The revision management functionality consists mainly of tracking document revisions and ensuring that the right person gets the right revision document at the right time. All the studied tools allow users to identify the document by revision number. However, SmartUse and BIM360 Team have the particularity of allowing users to detect revision numbers from paper automatically using the Optical Character Recognition (OCR) technology. In an industry where papers still occupy an important role in sharing data, such as the construction industry, OCR technology remains an important feature to facilitate the digitization of documents. The four studied tools allow users to increment a revision number in a sequence. In other words, when applying a change, a user can only promote a document revision from A.n to B.1, making it the last updated revision. The user can navigate the revision history to review and restore previous revisions. However, a simple incrementation of the revision index may not be sufficient to inform the user of the nature of the change. In reverse, Smarteam and 3DExperience make the difference between minor revision when the interchangeability is kept and major revision when the interchangeability is broken. Smarteam and 3DExperience also offer an interesting feature for concurrent engineering by allowing users to create different branches from a revision to studying alternative solutions. In this case, two users can apply various changes separately with no risk of interference. At the end, one alternative will be approved and continue to be released. Smarteam allows users to check out a revision from the shared vault to their local machine to apply changes to prevent simultaneous modification in one revision. 3DExperience offers a similar feature by allowing a user to reserve a document making it non-editable to other users.

The phases of a D/ECM can be defined and managed through the workflow management functionality offered by 3DExperience and Smarteam. The former helps automatically control engineering change processes by allowing users to create change requests, change orders, and change actions. In the change request, the user can identify problems. Next, in the change order, the way of implementing the change is defined. Finally, roles are assigned in the change action, and the impacted documents are shared. Similarly, change requests and change orders can be created through Smarteam. In contrast, these features are not presented in the tools adopted by the BIM-supported industries, where workflows were raised and tracked by emails and Excel sheets.

Table 3.3 Comparison of available D/ECM tools' functionalities

Functionalities	Description	SmartUse	BIM360 Team	Smarteam	3DExperience
Issue management	Raising issues	✓		✓	✓
	Assigning issues	✓		✓	✓
	Tracking issues	✓		✓	✓
Viewing	Viewing 2D documents	✓	✓	✓	✓
	Viewing 3D documents		✓	✓	✓
	Taking measures	✓	✓	✓	✓
	Navigating through models		✓	✓	✓
	Creating section		✓	✓	✓
Annotation	Annotating 2D documents	✓	✓	✓	✓
	Annotating 3D documents		✓	✓	✓
Sharing	Sharing document on central repository	✓	✓	✓	✓
	Sharing documents via email	✓	✓		✓
	Sharing document via hyperlink	✓	✓	✓	✓
	Sharing document on communities		✓		✓
File management	Creating, modifying, and deleting files	✓	✓	✓	✓
	Arranging files and folders hierarchically	✓	✓	✓	✓
	Add or edit metadata of files	✓	✓	✓	✓
	Files' visibility			✓	✓
	Ranging different types of files' extensions	✓	✓	✓	✓

Table 3.3 Comparison of D/ECM tools' functionalities (suite)

Functionalities	Description	SmartUse	BIM360 Team	Smarteam	3DExperience
Access management	Assigning roles for users	✓	✓	✓	✓
	Requesting for access		✓		✓
	Modifying users' role	✓	✓	✓	✓
Impact analysis	Comparing 2D documents	✓	✓	✓	✓
	Comparing 3D models		✓	✓	✓
	Comparing by overlay	✓	✓	✓	✓
	Comparing by side-by-side	✓			
	Displaying all documents related to the selected object			✓	✓
	Displaying the last revision of the impacted documents			✓	✓
	Displaying all the revisions of the impacted documents			✓	✓
Revision management	Identifying documents by a unique identifier	✓	✓	✓	✓
	Optical Character Recognition (OCR)	✓	✓		
	Incrementing document number in sequence	✓	✓	✓	✓
	Creating a minor revision			✓	✓
	Creating a major revision			✓	✓
	Creating a new branch			✓	✓
	Navigating through a document history	✓	✓	✓	✓
	Check-in/check-out a document			✓	✓
	Reserve a document				✓
Workflow management	Creating change requests			✓	✓
	Creating change orders			✓	✓
	Creation change actions				✓

3.5 Discussion

The findings reported in this paper present some significant contributions to the comparison between BIM- and PLM-supported industries from the standpoint of D/ECM by comparing the functionalities of document management tools adopted during the D/ECM processes.

Unsurprisingly, the comparison showed that PDM/PLM tools adopted by our industrial partners provide more advanced features than those adopted on the construction side (SmartUse and BIM 360 Team). Smarteam and 3DExperience can help automate the D/ECM process by digitalizing the process phase like engineering change request and engineering change orders. The absence of these features in the tools used by the construction partners may be linked to the fact that our construction partners rely more on e-mail and phone calls to raise change requests and follow up on their progresses. Furthermore, the revision management feature seems to be more complete by distinguishing between minor and major revisions and allowing users to create branches from previous revisions. Besides, the check-in/check-out functionality in Smarteam and in 3DExperience help prevent overwriting revisions after modifications. It is worth mentioning that some BIM tools like Procore provide features related to managing design change phases and the reservation of models. However, this study focuses on the tools adopted by the industrial partners. The tools presented in this paper may not be the top tools for managing revision in PLM- or BIM-supported industries. Yet, describing them give an outlook of the manner revisions can be managed in some of today's actual industry practice. Some of the presented tools are no longer maintained by their organization like Smarteam and BIM360 Team. Our partners' ongoing use of non-maintained tools may suggest how challenging it is to migrate to newer tools or to replace their old in-house developed tools.

This study also has some limitations that are difficult to avoid. First, the research has focused only on four projects due to the effort required to document each case study. Besides, since this paper focuses on the document management tools adopted by only four partners, the results cannot be generalized and does not pretend to offer a complete overview of the state of document management tools in BIM- and PLM-supported industries. Further work is required

to be able to present such an overview. Second, although SmartUse is not a BIM tool, according to (buildingSMART, 2022), we find it essential to include it in the comparison since it corresponds to actual industry practice and it presents a good way to share data, especially with contractors who have not fully adopted BIM tools yet. Finally, exploring all the functionalities offered by the adopted tools, especially for Smarteam and BIM 360 Team, was also quite challenging since they are no longer supported by their companies: Dassault Systems and Autodesk. To overcome this limitation, we relied more on the documentation offered by our industrial partners to depict their practices in using these tools. Thus, we were able to get a more realistic view of the use of document management tools in our industrial partners.

3.6 Conclusion

This thesis aimed to compare the functionalities of document management tools adopted by BIM- and PLM- supported industries during a D/ECM process. The research was conducted through semi-structured interviews with four industrial partners from the construction, energy, and aeronautic industries. Each partner's D/ECM process was mapped using the BPMN 2.0 format and validated by the partner. For confidentiality reasons, the BPMNs that were documented are not presented in this article. They were, however, used to extract the activities our partners do and the tools they use. Next, the authors identified and explored the tools that are used to manage documents throughout each partner's D/ECM process. Finally, the tools' functionalities were presented and compared to show the main similarities and differences between the tools.

During the documentation phase of this study, we found out that BIM-supported partners do not have any documented DCM process. Instead, they manage changes through informal steps. While this article presents the DCM processes followed in two private construction projects, it is essential to mention that DCM processes on the construction side can differ depending on the project type (public or private). Furthermore, we observed that the adoption of document management tools like SmartUse and BIM 360 Team on the construction side did not eliminate the use of Excel sheets and email applications to track and share documents. The BIM/PLM-

supported partner and the PLM-supported partner on the other hand, rely on a combination of internally developed and commercial tools (SmarTeam and 3DExperience) to manage their documents. That combination of tools can lead to documents being stored in different databases and result in duplicating documents. Migrating to a single PLM platform remains challenging for partners C and D due to the huge number of documents they have related to equipment that is still in service. The PDM and PLM tools examined offer more advanced functionalities in terms of revision management, impact analysis, and workflow management. However, the availability of advanced functionalities does not necessarily mean that they are used.

This chapter contributes to the corpus of knowledge related to BIM and PLM comparison by comparing the functionalities of document management tools adopted in different industries through case studies. In addition, comparing tools' functionalities can offer some hints, especially for construction companies, about how they can improve their design change management practices by incorporating features offered by other tools that are not typically used in the construction industry. Moreover, the results presented in this research will help researchers identify possible cross-pollination between the construction industry and other manufacturing industries. Additional work is still required to investigate a wider variety of tools and processes to map and improve D/ECM practices in the construction and manufacturing industries.

Acknowledgment

This research was supported partially by Mitacs Globalink and NSERC. We thank our industrial partners for their assistance and attention to this study.

CHAPITRE 4

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

4.1 Discussion des résultats

Ce travail vise principalement à comparer les fonctionnalités des outils informatiques adoptés pour gérer les documents durant un processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie chez des industries soutenues par le BIM et d'autres soutenues par le PLM.

Les résultats tirés de quatre études de cas chez des partenaires de la construction, de l'énergie, et de l'aéronautique ont confirmé que les outils PLM (Smarteam et 3DExperience) offrent des fonctionnalités plus avancées en termes de gestion des documents et de gestion des phases des processus de gestion des modifications. En fait, Smarteam et 3DExperience peuvent contribuer à l'automatisation du processus D/ECM en numérisant des phases de processus telles que les demandes de modifications et les ordres de modifications. Nous avons remarqué que l'absence de ces fonctions dans les outils de construction conduit les entreprises de construction à se fier davantage aux courriels et aux appels téléphoniques pour formuler des demandes de modification et suivre l'évolution de leur statut. En outre, la fonction de gestion des révisions semble être plus complète chez les outils PLM en faisant la distinction entre les révisions mineures et majeures et en permettant aux utilisateurs de créer des branches à partir des révisions précédentes. Par ailleurs, la fonctionnalité de check-in/check-out de Smarteam et la fonctionnalité de réservation de 3DExperience permettent d'éviter le chevauchement des révisions après les modifications.

4.2 Défis d'adoption des outils informatiques

Cette étude offre une vue sur les pratiques actuelles de gestion des documents dans les industries soutenues par le BIM et les industries soutenues par le PLM. La collecte des données réalisée durant cette étude a montré l'absence de la documentation des processus dans les entreprises du domaine de la construction. En effet, les étapes de processus de gestion des modifications de conception sont faites souvent d'une manière informelle et ne suivent pas une démarche prédéfinie. Comme indiqué dans l'article de conférence présenté dans l'Annexe I, on remarque que malgré l'adoption des outils de gestion des documents, les pratiques traditionnelles de gestion des documents restent présentes. Les applications bureautiques ainsi que les courriels demeurent les outils principaux pour créer et partager les demandes de modification de conception. Les utilisateurs doivent alors faire l'effort pour maintenir les données pertinentes et faire le suivi des modifications de conceptions.

En outre, on observe que les entreprises PLM et hybride BIM/PLM évaluées adoptent des outils de gestion des données développées à l'interne en parallèle avec des outils commerciaux (Tableau 3.2). En fait, cela est expliqué principalement par la difficulté de la migration totale vers les outils commerciaux afin de conserver les nombreuses données des produits qui sont encore en service.

4.3 Limitations

Cette étude présente plusieurs limitations difficiles à éviter. Tout d'abord, la recherche ne s'est concentrée que sur quatre projets. Une étude plus étendue permettrait de faire une comparaison plus complète et représentative de la diversité des pratiques industrielles. Puisque cet article étudie les outils de gestion de documents adoptés par seulement quatre partenaires, les résultats obtenus ne peuvent pas être généralisés et n'offrent pas un portrait exhaustif de l'état des outils de gestion de documents dans les industries soutenues par le BIM et le PLM. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour être en mesure de présenter un tel portrait. Deuxièmement, bien que SmartUse ne soit pas un outil BIM (buildingSMART, 2022), nous estimons qu'il est essentiel de l'inclure dans la comparaison, car il présente un bon moyen de

partager des données, en particulier avec les entrepreneurs qui n'ont pas encore totalement adopté les outils BIM. Enfin, l'exploration de toutes les fonctionnalités offertes par les outils adoptés, en particulier pour Smarteam et BIM 360 Team, s'est également avérée assez difficile car ils ne sont plus pris en charge par leurs éditeurs : Dassault Systèmes et Autodesk. Pour pallier cette limitation, nous nous sommes davantage appuyés sur la documentation offerte par nos partenaires industriels pour décrire leurs pratiques d'utilisation de ces outils. Ainsi, nous avons pu obtenir une vision plus réaliste de l'utilisation des outils de gestion documentaire chez nos partenaires industriels.

4.4 Perspectives

Au cours de la préparation de ce mémoire, quatre processus D/ECM ont été documentés via des entrevues semi-dirigées avec quatre partenaires des secteurs de la construction, de l'énergie et de l'aéronautique. L'étude des fonctionnalités des outils informatiques utilisés pour gérer les demandes de modifications de conception/d'ingénierie a été limitée à quatre outils : SmartUse, BIM360 Team, Smarteam, et 3DExperience. Afin de présenter un portrait plus exhaustif des fonctionnalités des outils BIM et PLM, on propose d'élargir l'éventail des outils étudiés dans les recherches futures. Des critères précis de sélection doivent être établis pour définir ce qu'on entend par un outil BIM et un outil PLM. Idéalement, le choix des partenaires industriels devrait se baser essentiellement sur le niveau de maturité des outils BIM/PLM utilisés. Ainsi, en plus de la documentation des pratiques des partenaires industriels, il sera utiles de documenter leurs besoins et les fonctionnalités qu'ils souhaitent ajouter à leurs outils actuels. Cela aiderait les chercheurs, après avoir étudié les fonctionnalités offertes par les outils de chaque partenaire, à proposer des recommandations de bonnes pratiques pour les outils disponibles.

CONCLUSION

Ce mémoire visait à comparer les fonctionnalités offertes par ces outils durant un processus de gestion des modifications de conception/d'ingénierie. La recherche a été menée par le biais d'entretiens semi-structurés avec quatre partenaires industriels des secteurs de la construction, de l'énergie et de l'aéronautique. Le processus D/ECM de chaque partenaire a été cartographié et validé en utilisant le format BPMN 2.0. Pour des raisons de confidentialité, les BPMN documentés n'ont pas été présentés dans cet article. Ils ont cependant été utilisés pour extraire les activités de nos partenaires et les outils exploités. Ensuite, les auteurs ont identifié et exploré les outils utilisés pour gérer les documents mis en jeu dans le processus de gestion des modifications techniques. Enfin, les fonctionnalités des outils ont été présentées et comparées, montrant les principales similitudes et différences entre les outils.

Au cours de la phase de documentation de cette étude, nous avons découvert que les partenaires soutenus par BIM n'ont pas de processus de DCM documenté. En revanche, ils gèrent les modifications à travers des étapes informelles. Bien que ce travail présente les processus de DCM suivis dans deux projets de construction privés, il est essentiel de mentionner que les processus de DCM du côté de la construction peuvent différer selon le type de projet (public ou privé). En outre, nous avons observé que l'adoption d'outils de gestion des documents tels que SmartUse et BIM 360 Team du côté de la construction n'a pas éliminé l'utilisation de feuilles Excel et d'applications de courriel pour suivre et partager les documents. En revanche, le partenaire soutenu par le BIM/PLM et le partenaire soutenu par le PLM s'appuient sur une combinaison d'outils développés en interne et d'outils commerciaux (SmarTeam et 3DExperience) pour gérer leurs documents. Cette combinaison d'outils peut conduire à ce que les documents soient stockés dans différentes bases de données et entraîner la duplication des documents. La migration vers une plate-forme PLM unique reste un défi pour ces partenaires en raison du nombre considérable de documents qu'ils possèdent concernant des équipements encore en service. Les outils PLM examinés offrent des fonctionnalités plus avancées en

termes de gestion des révisions, d'analyse d'impact et de gestion des flux de travail. Cependant, la disponibilité de fonctionnalités avancées ne signifie pas nécessairement qu'elles sont utilisées.

Cette étude contribue au corpus de connaissances relatif à la comparaison des environnements BIM et PLM en comparant les fonctionnalités des outils de gestion des documents adoptés dans chaque domaine à travers des études de cas réels. En outre, la comparaison des fonctionnalités des outils peut constituer un bon support, notamment pour nos partenaires industriels du secteur de la construction, en vue d'améliorer leurs pratiques de gestion des changements de conception en tirant parti des fonctionnalités offertes par d'autres outils. En outre, les résultats présentés dans cette recherche aideront également les chercheurs à identifier des pistes de pollinisation croisée entre la construction et d'autres industries de fabrication. Un travail plus approfondi est encore nécessaire pour étudier à plus grande échelle des outils et les processus de gestion des modifications techniques et pour cartographier et améliorer les pratiques de D/ECM dans les industries de la construction et de la fabrication.

ANNEXE I

ROLE OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE DESIGN CHANGE MANAGEMENT PROCESS

Ghnaya, Oussama^{1,4}, Pourzare, Hamidreza², Rivest, Louis³, and Boton, Conrad⁴

¹ École de technologie supérieure, Canada

⁴ oussama.ghnaya.1@ens.etsmtl.ca

Article présenté à la Canadian Society for Civil Engineering Conference (CSCE 2022) le 25 Mai
2022 à Whistler, Vancouver

Abstract: Design changes are an unavoidable reality in the construction industry. After construction documents are released, changes may be made to them by different stakeholders for various reasons. Design changes must be well managed in accordance with a design change management (DCM) process to avoid time and cost overruns. Furthermore, the right tools must be used to facilitate the flow of documents and ensure stakeholders have the most recent documents. Electronic document management systems (EDMSs) have been introduced to facilitate the storing, sharing, and tracking of documents in electronic format. This research aims to report on the real use of an EDMS in the construction industry as part of a DCM process. Six semi-structured interviews were conducted with a construction project director to document the DCM processes applied in two ongoing construction projects, one of which involved the use of an EDMS. The data collected served to compare the functionalities of the different tools used during the DCM processes. The main results show that traditional tools (e.g., PDF reader and email application) and the EDMSs adopted share some functionalities. However, the EDMS offers significant advantages in terms of collaboration and traceability.

1. Introduction

The construction industry has always been characterized by its fragmented nature. Various stakeholders with different backgrounds collaborate to deliver a project that responds to the

client's requirements. Documents, which can take the form of contracts, instructions, bids, or drawings, play a crucial role in the transfer of knowledge between stakeholders during the design and construction phases (S.Ahmad, M. Bazlamit, & D. Ayoush, 2017). However, they are almost inevitably subject to changes in the construction industry (Hao et al., 2008). Changes can be necessary to rectify errors or recommended to make improvements or adapt elements when requested by the client (Jarratt et al., 2011). If changes are not managed properly, they can lead to time and cost overruns. It therefore seems necessary to adopt a design change management (DCM) process to define participants' tasks and the flow of information. Changes have traditionally been transmitted by mail or email to the designated recipient on site with instructions to add, delete, or remove pages from the original document (N. Jadid & M. Idrees, 2005). This does not guarantee that the right person has the right version of a document at the right moment. As a result, one mistake in a single document can lead to costly execution errors.

Today, electronic document management systems (EDMSs) are used in the construction industry to overcome document management issues in a paperless environment. EDMSs can serve to securely index, edit, store, and retrieve documents. In addition, using an EDMS can significantly facilitate DCM (N. Jadid & M. Idrees, 2005). This paper focuses on presenting the role EDMSs play in real-world DCM processes in the construction industry. Two DCM processes, one of which involves the use of a commercially available EDMS (SmartUse), are documented and compared from the standpoint of tool functionality. The article is organized into six sections. Section 2 presents the DCM processes that are proposed in the literature as well as a generic one used to compare the two DCM processes studied. Section 3 reviews the EDMS used and its functionalities. Section 4 presents the methodology adopted to collect and analyze the data describing the two DCM processes in question. Section 5 shows the main results, focusing on the similarities and differences between the functionalities of the tools used in the DCM processes studied. Finally, Section 6 provides a discussion of the results and concludes the work.

2. Design change management process

Design changes are a common occurrence in construction projects and can be made at any stage of a project (Hao et al., 2008). A design change is defined as any change to the scope of work as described in the contract agreements (Sun et al., 2006). It may apply to architectural, structural, plumbing, drainage, site work, or other aspects of construction. Design changes can have significant negative impacts on costs and scheduling (Moayeri et al., 2017). Furthermore, Hallock (2006) considers design changes to be one of the major causes of project failure. Changes can become a major source of contract disputes if they are not managed in accordance with a structured change management process (Hao et al., 2008). Some research studies in the literature propose different DCM processes to help control and guide design changes. Table-A I-1 sets out five DCM processes proposed in the literature (Ibbs et al., 2001), (Sun et al., 2006), (Motawa et al., 2007), (Mejlænder-Larsen, 2017), and (Hao et al., 2008).

Table-A I-1 Design Change Management Processes from the Literature

Author	Year	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Ibbs, Wong, and Kwak	2001	Promote a balanced change culture	Recognize change	Evaluate change	Implement change	Continuously improve from lessons learned
Sun et al.	2006	Start-up	Identification and evaluation	Approval	Implementation and review	
Motawa et al.	2007	Start-up	Identify and evaluate	Approval and propagation	Post change	
Mejlænder-Larsen	2007	Identification	Filtration	Evaluation	Approval	Implementation
Hao et al.	2008	Identify change	Evaluate and propose change	Approve change	Implement change	Analyze change

It is worth mentioning that it is difficult to establish a standard DCM process due to the particularity of each construction project. However, we can notice from Table 1 that there are some similarities between the processes proposed and that some activities remain applicable despite the differences between projects. A DCM process generally includes four stages:

- **Identification:** In this stage, the need for a change is identified. A change can be issued by the client to alter one or more specifications mentioned in the contract, by professionals due to technical issues, or by contractors due to execution problems.
- **Evaluation and proposal:** The proposed change's impact on the project's schedule and budget is evaluated. Evaluation is usually done by a change board that includes the affected stakeholders. In some cases, the client is also included when the change affects the scope of the project. During this stage, various solutions are proposed and evaluated to resolve the issue raised.
- **Approval:** The change board approves one solution to be implemented based on the evaluation of the solutions proposed and the feedback of the different departments impacted.
- **Implementation:** In this stage, the approved solution is implemented, meaning the impacted documents (drawings, contracts, bids, etc.) are modified and the stakeholders concerned are notified to execute the change on site.

In addition to these four stages, some authors propose a fifth (initial) stage for DCM planning (Motawa et al., 2007; Sun et al., 2006) that includes team building, role clarification, and agreement on change management methods and procedures. The goal of this extra step is to improve the project team's ability to respond to change, effectively manage change, and create contingency preparations for any required changes. Moreover, Hao et al. (2008) and Ibbs et al. (2001) propose a review stage at the end to conduct an assessment, take remedial steps, compare the results to the initial goals, and apply lessons learned.

All the above stages require the accurate and timely analysis of project conditions and timely communication between project stakeholders. Appropriate tools are therefore needed to support the impacted professionals in completing these tasks (Sun et al., 2006).

3. Electronic document management system

An EDMS is a system that can securely coordinate and handle operations such as the storage, retrieval, processing, printing, routing, and distribution of electronic and paper documents so

that they may be used effectively by authorized personnel when needed (Asılı & Tanrıover, 2014). S.Ahmad et al. (2017) consider an EDMS to be a software application that collects paper and electronic documents for secure storage, retrieval, and archiving. Interestingly, N. Jadid & M. Idrees (2005) do not consider an EDMS to be a single technology, but rather a collection of information technology for scanning, indexing, editing, processing, storing, and retrieving documents to suit an engineer's needs relative to the information in the documents.

An EDMS helps to reduce a project's documentation costs and improve its quality. According to K. Hung et al. (2013), construction firms implement EDMSs for two key purposes: ubiquitous document access, and quick and easy data sharing and collaboration. In addition, EDMSs provide secure access to documents, reduce the amount of time required for project engineers to complete document-centered processes, and facilitate change management (N. Jadid & M. Idrees, 2005).

A variety of research studies have proposed and defined EDMS functionalities (Janne, 2003; Kuasmanen, 2019; Adam, 2008; Raynes, 2002). Their common basic functionalities are:

- **Document storage and retrieval:** The repository should serve as the central storage location for all a company's documents, with users able to access documents via search and retrieval or by browsing (Janne, 2003).
- **Foldering:** With virtual folders, a single classification level can be shown in multiple folders throughout the system. Searching for a document is made easier when documents are stored in separate folders according to their context (Janne, 2003).
- **Document relations:** In the context of document management, the term "relations" refers to the relationships that exist between documents. Relationships are frequently established using database relations, which makes relation administration easier. For example, changes made in some documents can be applied automatically in all linked documents depending on the type of document relations (Janne, 2003).
- **Integration with desktop applications:** Users can save documents to EDMSs directly in the desktop applications in which they were created, like Microsoft Office (Kuasmanen, 2019; Adam, 2008).

- **Document viewing:** Most EDMSs have viewing capabilities to be able to quickly read a document directly in the system. This allows users to see documents without having to open them in the application in which they were created (Janne, 2003).
- **Document review:** Users can add comments to a document without actually changing the document itself (Raynes, 2002).
- **Document comparison:** Users can compare two related files, for example, two different versions of a document, and record the differences using a comparison function (Janne, 2003).
- **User access management:** Individual users can have different access rights to documents. User access rights can be defined in a variety of ways and be specific to, for example, a user or user group, or a document or document group (Janne, 2003).
- **Check-in/check-out:** The check-in and check-out features regulate who is editing a document and when, and ensure that a document is being updated by only one person at a time (Adam, 2008).
- **Workflow:** The workflow functionality routes documents from one user to another in a controlled fashion (Raynes, 2002).
- **Version control:** When a document is modified, the system must be able to track the modifications made to it. This is accomplished by assigning the document a version number (Adam, 2008).
- **Document numbering:** Document numbering refers to the automatically numbering of documents according to predefined numbering standards. Numbering can follow a sequential numbering, a predetermined numbering sequence, or a combination of both (Janne, 2003).
- **Auditing:** Auditing, in combination with version control, keeps track of who made changes to a document and when. Authorized users can use the auditing tool to see what modifications have been made to a document since it was initially created (Adam, 2008).

4. Methodology

This article aims to report on the real use of an EDMS in the construction industry during a DCM process. Six semi-structured interviews were conducted with a project director from a Quebec construction firm to document and validate the DCM process used in two ongoing construction projects. For confidentiality reasons, the projects studied are referred to as “Project A” and “Project B”. An EDMS is used in Project B. In Project A, documents are managed in a more traditional way.

First, the Business Process Modeling Notation 2.0 (BPMN 2.0) format was chosen to model the DCM processes. BPMN is a graphical representation of the logic of business process steps (Chinosi & Trombetta, 2012). This format was created specifically to organize the sequence of procedures and messages that pass between participants in various activities. In addition, project-related documents including emails, contracts, drawings, project descriptions, change requests, and change orders have been analyzed to understand the flow of documents during the DCM process.

Next, the activities identified in Project A and Project B were classified into the four phases that constitute a generic DCM process: identification, evaluation and proposal, approval, and implementation. Then, the different functionalities of the tools used were associated with their relevant activities.

Last, the DCM processes used in Project A and Project B were compared from the standpoint of tool functionality. It is important to mention that this study concerns the tools used to manage released documents after the design phase. For this reason, the study of CAD tool functionalities is outside the scope of this study.

5. Results

In this section, the results obtained from the data collected through our semi-structured interviews are presented. We describe the two projects studied and the types of documents used, and then provide a detailed comparison of the phases of their DCM processes and the functionalities of the tools used.

5.1. Presentation of the studied projects

The DCM processes of project A and B are presented in the ANNEXE II.

5.1.1. Project A

Project A is a private project that is 98% completed. The industrial partner is the project manager on this project. As with other construction projects, a variety of stakeholders are involved in the project. The main ones are the client, the project manager, professionals (including the engineering department), the general contractor, and subcontractors. It is important to mention that a change can be requested by any stakeholder at any stage. There is no formal DCM process to follow for this project. However, we have tried to document through the interviews the way changes are handled.

5.1.2. Project B

Project B is a private project that is 90% completed. The industrial partner is the construction manager on this project. Other project stakeholders include the client, professionals, the general contractor, and subcontractors. While traditional document management tools are used for this project, an EDMS has also been adopted to facilitate sharing the various project-related documents. The EDMS is managed by the construction manager, who takes charge of organizing the documents into different folders. The other stakeholders are granted access to the documents in line with their assigned roles.

5.2. Comparative analysis of the DCM processes used

In this section, we compare the different phases of the DCM processes used in the two projects studied. It is important to mention that various documents are exchanged between stakeholders during a DCM process. The documents used in Project A and Project B are:

- **Request for Information (RFI):** “A formal written procedure initiated by the contractor seeking additional information or clarification for issues related to design, construction, and other contract documents” (Hanna, Tadt, et Whited 2012).

- **Design Change Request (DCR):** “A list of changes from engineering” (Mejlænder-Larsen 2017).
- **Change Directive (CD):** The instruction proposed by the professionals to implement a change.
- **Contract Modification (CM):** The proposed modifications to the price and details in the contract.
- **Amendment:** The official/approved changes to the content of an agreement.

Our comparison aims to highlight the role of the tools’ functionalities in each activity. For this reason, the activities have been categorized into the four generic DCM process phases identified from the literature: identification, evaluation and proposal, approval, and implementation. It is important to mention that the activities our industrial partner performs in each phase may differ slightly from what is mentioned in the literature.

5.2.1. Identification phase

Project A

In this phase, the need for a change is identified. It can be raised by the client to modify the scope of the project or elements of the contract. It can also be identified by the general contractor or a subcontractor in the case of a site issue or drawing mistake. In the latter case, an RFI is usually issued to the professionals to get the clarifications needed. An Excel sheet that contains details about the creation of RFIs and their associated answers ensures RFIs are followed up on. In some cases, an RFI can be promoted to a DCR. The email application is the main tool used for communication between stakeholders.




Project B

As in Project A, a change can be requested by the client to alter the scope of the project or by the professionals in the case of design errors. The general contractor can also issue an RFI to the professionals to obtain clarification about issues related to the construction drawings. In the latter case, there is usually a back and forth between the general contractor, the subcontractors, and the professionals to clarify the issues. In some cases, an RFI can be

promoted to a DCR. An Excel sheet that indicates the date of creation of RFIs, the answers, and the departments concerned is used to track and respond to RFIs. Documents are shared in the EDMS, and the review and comment features allow stakeholders to annotate documents and drawings directly in the system. Interestingly, the email application is still used for communication between stakeholders.

Table-A I-2 Activities and tool functionalities considered in the identification phase
Activities

Activities	Tools			
	Desktop Applications	PDF Viewer	Email Application	EDMS
Create/revise an RFI	Create text document; Convert document to PDF	Annotate document		Upload document; Move document to a folder; Link documents; Review document
Share an RFI			Share document	Share document
Update the table of the following RFI	Create and modify sheets			
Respond to an RFI	Create text document; Convert document to PDF	View document; Annotate document	Share document	View document; Review document
Evaluate the answer to an RFI		View document; Review document		View document; Review document
Evaluate the need for a DCR		View document; Review document		View document; Review document
Create a DCR	Create text document; Convert document to PDF			
Share a DCR			Share document	Share document

 : Project A
  : Project B
  : Projects A & B

Comparison

Table-A I-2 shows the similarity between the activities involved in Project A and Project B that were considered during the identification phase. All the activities of project A were shared with project B and shown in pink cells. In terms of tool functionality, we observe the EDMS used in Project B has some functionalities in common with other tools. For example, both the

EDMS and the PDF Reader are used to annotate and view documents, and both the EDMS and the email application are used to share documents.

5.2.2. Evaluation and proposal phase

Project A

In this phase, the professionals concerned issue CDs to resolve the issues raised in DCRs, and impacted drawings are updated. The CDs are then evaluated by the engineering departments. A CD can be accepted, rejected, or revised. Once a CD is accepted, it is communicated to the general contractor, the client, and the project manager by email with all the updated documents. CD follow-up is done in an Excel sheet.

Project B




In this project, the DCR created is evaluated by the professionals concerned. If the change requested impacts the cost of the project or the details of contracts, multiple CDs are created to propose solutions and evaluated by the professionals to determine their potential impacts before a single CD is approved. The drawings and documents impacted are updated and shared via the EDMS. An Excel sheet is also used to keep track of the CDs created.

Comparison

As in the previous phase, the table below shows there are some similarities between the two projects. We can see that Project B's evaluation activities are done entirely in the EDMS. Users do not need to access the native applications to annotate documents and leave comments in them. In addition, a comparison feature allows users to compare two drawings either by putting them side-by-side or by overlaying them. Despite these features, traditional practices are also used in Project B. In some cases, documents are reviewed and annotated in the PDF Viewer or by hand. In addition, the email application is still used to share documents. It seems that the EDMS has not yet replaced the traditional tools.

Table-A I-3 Activities and tool functionalities considered in the evaluation and proposal phase

Activities	Tools			
	Desktop Applications	PDF Viewer	Email Application	EDMS
Evaluate a DCR		Annotate document		Annotate document; Compare document; View document
Create/revise a CD	Create text document; Convert document to PDF			Upload document; Create new revision
Share a CD			Share document	Share document
Evaluate a CD		View document; Review document		View document; Review document
Update the table of the following CD	Create and modify sheets			

 : Project A
  : Project B
  : Projects A & B

5.2.3. Approval phase

Project A

Once a CD has been issued, the general contractor and subcontractors provide a CM that sets out the working procedure, time frame, and estimated cost to execute the change. The CM is then evaluated and recommended to the client by the professionals and the project manager. The client has the final say whether to accept, reject, or revise the CM. Again, communication and negotiation are done via email, and an Excel sheet is used to ensure CM follow-up.

Project B




The approved CD is communicated to stakeholders. The general contractor and the subcontractors evaluate the CD and put forward bids to execute the change. There is also a back and forth between the professionals, the general contractor, and subcontractors in this stage. The bids are accepted, rejected, or revised by the client. Once the stakeholders agree on how to implement the change, the construction manager creates an amendment to modify the content of the initial agreement. Finally, the amendment is approved by the client.

Comparison

In the approval phase, there are some differences between the two projects in terms of the types of documents used. For example, bids are used in Project B to communicate the new proposed cost estimate, whereas a CM is used in Project A to set out the working procedure, time frame, and estimated cost to execute a change. The differences are mainly due to the nature of the contracts. During this phase, approved documents are signed. In a paperless environment, e-signatures are used in place of traditional signatures.

Table-A I-4 Activities and tool functionalities considered in the approval phase

Activities	Tools			
	Desktop Applications	PDF Viewer	Email Application	EDMS
Create/revise a CM	Create text document; Convert document to PDF			
Share a CM			Send document	
Evaluate a CM		View document; Review document		
Update the table of the following bids	Edit text			
Create/revise bids	Create text document; Convert document to PDF			Create new revision
Share bids				Share document
Evaluate bids				Add a stamp
Update the table of the following CD	Create and modify sheets			
Update the table of the following amendment	Create and modify sheets			

 : Project A
  : Project B
  : Projects A & B

5.2.4. Implementation phase

Project A

Once the CM is approved, the updated documents are shared with the contractor and the subcontractors, who execute the change.

Project B

The updated documents are shared with the contractor and subcontractors to execute the change. In this case, using the EDMS ensures that the right version of the documents is

available for the right people. The construction manager and the professionals follow up on the execution of changes to ensure compliance with the final document.

Comparison

There are no major differences between Project A and Project B in this stage.

Table-A I-5 Activities and tool functionalities considered in the implementation phase

Activities	Tools			
	Desktop Applications	PDF Viewer	Email Application	EDMS
Share final document			Share document	Share document
Execute change		View document		View document

: Project A
 : Project B
 : Projects A & B

6. Discussion and conclusion

The research presented in this paper helps to understand how design changes are managed in the construction industry and underlines the roles that are played by an EDMS during a DCM process.

First and foremost, the results show that the two projects studied rely heavily on desktop applications. Microsoft Word is the main tool used to create and modify documents including RFIs, DCRs, and CDs. Microsoft Excel is used to track the status of documents, with a separate sheet used for each type of document. The email application is the main tool used for communication between stakeholders and to share documents. It is worth mentioning that the telephone is also used in some cases to informally request changes. This type of change request is difficult to track.

The results also show that the EDMS used in Project B has some functionalities in common with the PDF viewer and the email application, such as document sharing, viewing, and review. However, it is the only tool to offer a secure repository where documents can be easily shared

and kept track of. In addition, its version control functionality makes quick work of tracking modifications. Users can thus be sure they are working on the most recent version of documents. Despite these advantages, it seems that the EDMS has not yet replaced the traditional way of sharing and tracking documents.

Since this research presents a qualitative comparison of two DCM processes, it was difficult to reveal the real impact of adopting an EDMS, especially in terms of the time frame and cost of a project. The BPMN models generated could be used to simulate the time it takes to execute a design change. However, it was hard to determine the true duration of each activity.

Last, it is worth mentioning that the processes documented helped our industrial partner gain an overall view of its DCM processes. In addition, even though process improvement was not part of the scope of this research, the documentation of the processes will undoubtedly help our industrial partner make significant improvements to their processes.

ANNEXE II

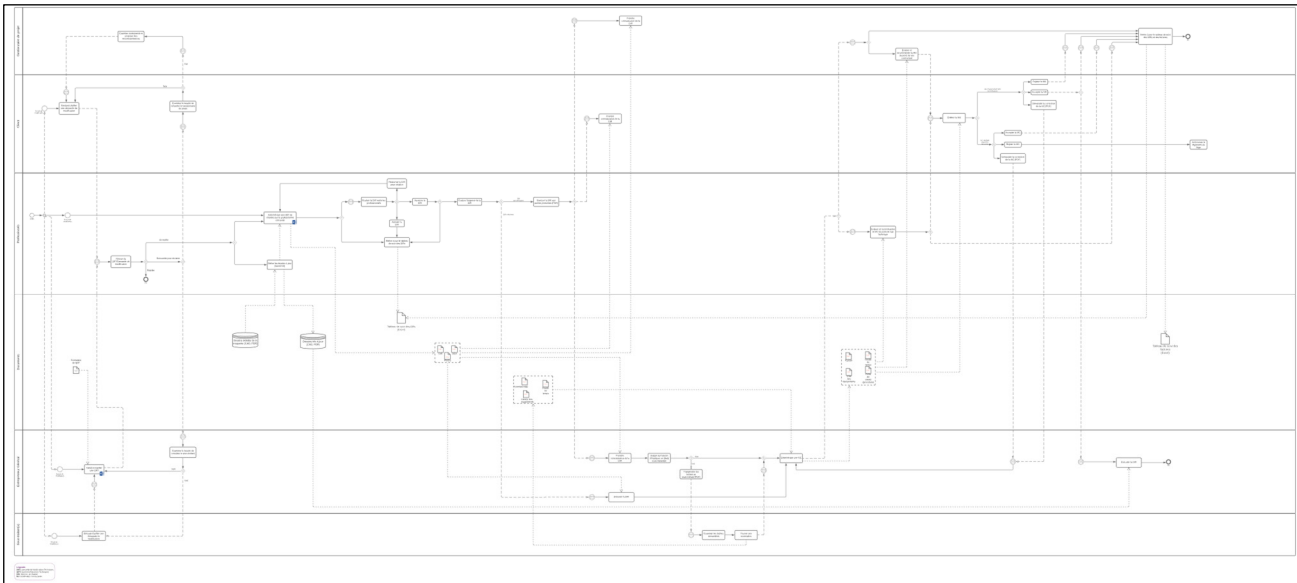
LES PROCESSUS DE GESTION DES MODIFICATIONS DE CONCEPTION DU
PARTENAIRE A

Figure-A II-1 Processus de gestion des modifications de conception pour le partenaire A (Projet A)

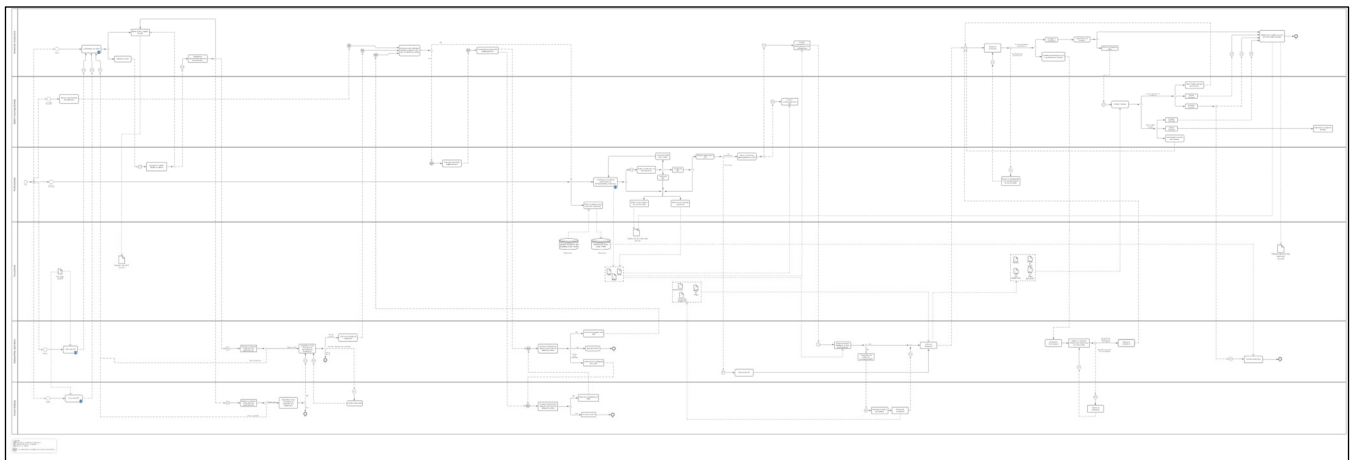


Figure-A II-2 Processus de gestion des modifications de conception pour le partenaire A (Projet B)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 3DExperience. 2022. « La plate-forme 3DEXPERIENCE, une révolution pour les entreprises et l'innovation. » Dassault Systèmes. Consulté 23 octobre 2022 (<https://www.3ds.com/fr/3dexperience>).
- Abdul-Rahman, Hamzah, Chen Wang, et Jeffrey Yap. 2017. « Impacts of design changes on construction project performance: Insights from literature review ». *Journal de Quantity Surveying & Construction Business* Vol 7:31-54.
- Adam, Azad. 2008. *Implementing Electronic Document and Record Management Systems*. Auerbach Publications.
- Ahmad, N., D. C. Wynn, et P. J. Clarkson. 2014. « Development and evaluation of a tool to estimate the impact of design change ». *International design conference*.
- Alwi, A., K. D. Hampson, et S. A. Mohamed. 2002. « Factors Influencing Contractor Performance in Indonesia: A Study of Non-Value-Adding Activities ». *International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management and Maintenance of Building Structures*, 20-34.
- Amor, R. W., et C. W. Ge. 2002. « Mapping IFC versions ». P.373 *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*.
- Asılı, Harika, et Omer Ozgur Tanriover. 2014. « Comparison of Document Management Systems by Meta Modeling and Workforce Centric Tuning Measures ». *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology* 4(1):57-67. doi: 10.5121/ijcseit.2014.4106.
- Bergsjö, Dag, Amer Catic, et Johan Malmqvist. 2008. « Implementing a Service-Oriented PLM Architecture Focusing on Support for Engineering Change Management ». *Int. J. Product Lifecycle Management*, 3, 335-55.
- BIM 360 Team. 2020. « BIM 360 Team | Design Collaboration Software | Autodesk ». Consulté 29 août 2022 (<https://www.autodesk.com/products/bim-360-team/overview>).
- Boton, Conrad, Louis Rivest, Daniel Forgues, et Julie Jupp. 2016. « Comparing PLM and BIM from the Product Structure Standpoint ». P. 443-53 in *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*. Vol. 492, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, édité par R. Harik, L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard, et A. Bouras. Cham: Springer International Publishing.
- Boton, Conrad, Louis Rivest, Daniel Forgues, et Julie R. Jupp. 2018. « Comparison of Shipbuilding and Construction Industries from the Product Structure Standpoint ». *Int. J. Product Lifecycle Management*, 11, 191-220.

- BPMN. 2022. « BPMN Specification - Business Process Model and Notation ». Consulté 1 août 2022 (<https://www.bpmn.org/>).
- buildingSMART. 2022. « Software Implementations ». BuildingSMART Technical. Consulté 9 septembre 2022 (<https://technical.buildingsmart.org/resources/software-implementations/>).
- Burati, James L., Jodi J. Farrington, et William B. Ledbetter. 1992. « Causes of Quality Deviations in Design and Construction ». *Journal of Construction Engineering and Management* 118(1):34-49. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:1(34).
- Cheutet, Vincent, Aicha Sekhari, et Nathalie Corbeaux. 2018. « PLM and BIM Approach to Support Information Management in Nuclear Decommissioning: A Synthesis ». P. 104-14 in *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Vol. 540, IFIP Advances in Information and Communication Technology, édité par P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, et J. Ríos. Cham: Springer International Publishing.
- Chinosi, Michele, et Alberto Trombetta. 2012. « BPMN: An introduction to the standard ». *Computer Standards & Interfaces*.
- CIMdata. 1997. *Product Data Management-The Definition, an Introduction to Concepts, Benefits and Terminology*. 4th éd.
- Dale, B. G. 1982. « The Management of Engineering Change Procedure ». *Engineering Management International* 1(3):201-8. doi: 10.1016/0167-5419(82)90019-9.
- Daniotti, Bruno, Alberto Pavan, Sonia Lupica Spagnolo, Vittorio Caffi, Daniela Pasini, et Claudio Mirarchi. 2020. *BIM-Based Collaborative Building Process Management*. Cham: Springer.
- Di Biccari, Carla, Giovanna Mangialardi, Mariangela Lazoi, et Angelo Corallo. 2018. « Configuration Views from PLM to Building Lifecycle Management ». P. 69-79 in *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Vol. 540, IFIP Advances in Information and Communication Technology, édité par P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, et J. Ríos. Cham: Springer International Publishing.
- Eadie, Robert, Mike Browne, Henry Odeyinka, Clare McKeown, et Sean McNiff. 2013. « BIM Implementation throughout the UK Construction Project Lifecycle: An Analysis | Elsevier Enhanced Reader ». *Automation in Construction*, 36, 145-51.
- Eastman, C. M., Paul Teicholz, R. Sacks, et K. M. Liston. 2008. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Vol. 12. John Wiley & Sons.
- Eastman, Charles, David Fisher, Gilles Lafue, Joseph Lividini, Douglas Stoker, et Christos Yessios. 1974. « An Outline of the Building Description System ». *Carnegie-Mellon University* 22.

- Eastman, Charles M., Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, et Kathleen Liston. 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- Enovia Smarteam. 2020. « ENOVIA SMARTEAM ». Consulté 29 août 2022 (<https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/enovia/produits/smarteam/>).
- Hallock, B. 2006. « Managing change vs. administering the change order process ». *Nielsen-Wurster Communiqué* 1.6.
- Hamraz, Bahram, Nicholas H. M. Caldwell, et P. John Clarkson. 2013. « A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management ». *Systems Engineering* 16(4):473-505. doi: 10.1002/sys.21244.
- Hanna, Awad S., Eric J. Tadt, et Gary C. Whited. 2012. « Request for Information: Benchmarks and Metrics for Major Highway Projects ». *Journal of Construction Engineering and Management* 138(12):1347-52. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000554.
- Hao, Q., Weiming Shen, Joseph Neelamkavil, et John Thomas. 2008. « Change management in construction projects ».
- Hindmarch, H., A. W. Gale, et R. E. Harrison. 2010. « A Proposed Construction Design Change Management Tool to Aid In Making Informed Design Decisions ». 26th Annual ARCOM Conference, 6-8 September 2010, Leeds, UK, Association of Researchers in Construction Management 21-29.
- Huang, G. Q., et G. Johnstone. 1995. « CMCEA: change mode, cause and effects analysis – a concurrent engineering approach to cost-effective management of product design changes ». *International Conference on Engineering Design*, 1995.
- Huang, G. Q., W. Y. Yee, et K. L. Mak. 2001. « Development of a Web-Based System for Engineering Change Management ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 17(3):255-67. doi: 10.1016/S0736-5845(00)00058-2.
- Hung Kao, Chia, et Shin Rzu Liu. 2013. « Development of a Document Management System for Private Cloud Environment | Elsevier Enhanced Reader ». Consulté 8 février 2022 (<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877042813003649?token=761747478D31F876DCFCC785FE2F5C3C85EE65884E022FB304FFBA31EE53630FB84EA7D4CAC6635D59EF18EB94DAA87A&originRegion=us-east-1&originCreation=20220208151907>).
- Ibbs, C. William, Clarence K. Wong, et Young Hoon Kwak. 2001. « Project Change Management System ». *Journal of Management in Engineering* 17(3):159-65. doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(2001)17:3(159).

- IEC. 2001. « Document management - Part 1: Principles and methods ». (IEC 82045-1: 2001). Retrieved July 15, 2004
- Immonen, Anselmi, et Antti Saaksvuori. 2013. *Product Lifecycle Management*. Springer Science & Business Media.
- Isaac, Shabtai, et Ronie Navon. 2008. « Feasibility Study of an Automated Tool for Identifying the Implications of Changes in Construction Projects ». *Journal of Construction Engineering and Management* 134(2):139-45. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:2(139).
- Jaly Zada, Aras Jalal. 2016. « VERSIONING OF IFC-BASED INFORMATION MODELS FOR COLLABORATIVE DESIGN ». The University of Nottigham, United Kingdom.
- JalyZada, A., W. Tizani, et A. H. Oti. 2014. « Building Information Modelling (BIM)—Versioning for Collaborative Design ». P. 512-19 in *Computing in Civil and Building Engineering (2014)*. Orlando, Florida, United States: American Society of Civil Engineers.
- Janne, Yläjääski. 2003. *Document Management as a Part of Product Lifecycle Management*. Savonlinna.
- Jarratt, T. A. W., John Clarkson, et Claudia Eckert. 2004a. « Engineering Change ». P. p263-285 in *Design process improvement*. New York.
- Jarratt, T. A. W., C. M. Eckert, N. H. M. Caldwell, et P. J. Clarkson. 2011. « Engineering Change: An Overview and Perspective on the Literature ». *Research in Engineering Design* 22(2):103-24. doi: 10.1007/s00163-010-0097-y.
- Jarratt, Timothy A. W., P. John Clarkson, et Claudia Eckert. 2005. « Engineering change ». P. 263-85 in *Engineering Change in Design process improvement*. New York.
- Joshi, Nikhil, Farhad Ameri, et Debasish Dutta. 2005. « Systematic Decision Support for Engineering Change Management in PLM ». *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (DETC2005-85267)*.
- Jupp, J. R., et M. Nepal. 2014. « BIM and PLM: Comparing and Learning from Changes to Professional Practice Across Sectors ». P. 41-50 in *Product Lifecycle Management for a Global Market*. Vol. 442, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, édité par S. Fukuda, A. Bernard, B. Gurumoorthy, et A. Bouras. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jupp, J. R., et Singh Vishal. 2016. « A PLM perspective of BIM research initiatives ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, 180-97.

- Juszczuk, Michał, Andrzej Tomana, et Maja Bartoszek. 2016. « Current Issues of BIM-Based Design Change Management, Analysis and Visualization ». *Procedia Engineering* 164:518-25. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.653.
- Kassem, Mohamad, Nahim Iqbal, Graham Kelly, Stephen Lockley, et Nashwan Dawood. 2014. « Building Information Modelling: Protocols for Collaborative Design Processes ». *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* 24.
- Kocar, Vildan, et Ali Akgunduz. 2010. « ADVICE: A Virtual Environment for Engineering Change Management ». *Computers in Industry* 61(1):15-28. doi: 10.1016/j.compind.2009.05.008.
- Koch, Christian, et Berthold Firmenich. 2011. « An Approach to Distributed Building Modeling on the Basis of Versions and Changes ». *Advanced Engineering Informatics* 25(2):297-310. doi: 10.1016/j.aei.2010.12.001.
- Krämer, Markus, et Zsuzsa Besenyői. 2018. « Towards Digitalization of Building Operations with BIM ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 365:022067. doi: 10.1088/1757-899X/365/2/022067.
- Kuasmanen, Katariina. 2019. Evaluation of an electronic document management system implementation success from an end user perspective in an industrial company. University of Turku.
- Lee, Sang Hyun. 2006. « Dynamic Planning and Control Methodology: Understanding and Managing Iterative Error and Change Cycles in Large-Scale Concurrent Design and Construction Projects ». Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Likhitrungsilp, Veerasak, Tantri N. Handayani, Photios G. Ioannou, et Nobuyoshi Yabuki. 2018. « A BIM-Enabled System for Evaluating Impacts of Construction Change Orders ». P. 622-31 in *Construction Research Congress 2018*. New Orleans, Louisiana: American Society of Civil Engineers.
- Liu, Wei, Yong Zeng, Michael Maletz, et Dan Brisson. 2009. « Product Lifecycle Management: A Survey ». P. 1213-25 in *Volume 2: 29th Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*. San Diego, California, USA: ASMEDC.
- Mangialardi, Giovanna, Carla Di Biccari, Claudio Pascarelli, Mariangela Lazoi, et Angelo Corallo. 2017. « BIM and PLM Associations in Current Literature ». P. 345-57 in *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future*. Vol. 517, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, édité par J. Ríos, A. Bernard, A. Bouras, et S. Foufou. Cham: Springer International Publishing.
- Mauil, Roger, David Hughes, et Jan Bennett. 1992. « Special Feature. The Role of the Bill-of-Materials as a CAD/CAPM Interface and the Key Importance of Engineering Change

Control ». *Computing & Control Engineering Journal* 3(2):63. doi: 10.1049/cce:19920021.

Maurino, M. 1993. *La gestion des données techniques*. Masson, Paris.

Mejlænder-Larsen, Øystein. 2017. « Using a Change Control System and Building Information Modelling to Manage Change in Design ». *Architectural Engineering and Design Management* 13(1):39-51. doi: 10.1080/17452007.2016.1220360.

Mesihovic, Samir, Johan Malmqvist, et Peter Pikosz. 2004. « Product Data Management System-Based Support for Engineering Project Management ». *Journal of Engineering Design* 15(4):389-403. doi: 10.1080/09544820410001697190.

Moayeri, Valeh, Osama Moselhi, et Zhenhua Zhu. 2017. « Design Change Management Using BIM-based Visualization Model ». *International Journal of Architecture, Engineering and Construction* 6(1). doi: 10.7492/IJAEC.2017.001.

Mohamad, Mohamad Ibrahim, Mohammad Ali Nekooie, et Amur B. Salim Al-Harthy. 2012. « Design Changes in Residential Reinforced Concrete Buildings: The Causes, Sources, Impacts and Preventive Measures ». 22.

Motawa, I. A., C. J. Anumba, S. Lee, et F. Peña-Mora. 2007. « An Integrated System for Change Management in Construction ». *Automation in Construction* 16(3):368-77. doi: 10.1016/j.autcon.2006.07.005.

N. Jadid, M., et M. M. Idrees. 2005. « Electronic Document Management System (EDMS) in Civil Engineering Projects ». 33rd Annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineering.

Niknam, M., E. Huang, et J. Ovtcharova. 2014. « Towards A Decision Support System For Engineering Change Management ». DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference 1611-20.

Nour, Mohamed, Berthold Firmenich, Torsten Richter, et Christian Koch. 2006. « A Versioned IFC Database for Multi-disciplinary Synchronous Cooperation ». *International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*. 636-645

Ouertani, M. Z., S. Baïna, L. Gzara, et Morel. 2011. « Traceability and Management of Dispersed Product Knowledge during Design and Manufacturing | Elsevier Enhanced Reader ». *Computer-Aided Design*, 43, 546-62.

Ouertani, Mohamed Zied, Lilia Gzara Yesilbas, et Luc Lossent. 2004. « Engineering Change Process: State Of The Art, A Case Study And Proposition Of An Impact Analysis Method ». P. CDROM in, ISBN 1857901290. A. N. Bramley, et al., Eds.

- Peltokoski, Merja, Mika Lohtander, et Juha Varis. 2012. « Confusing of terms PDM and PLM: examining issues from the PDM point of view. » Conference: Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2012.
- Philpotts, Mike. 1996. « An Introduction to the Concepts, Benefits and Terminology of Product Data Management ». *Industrial Management & Data Systems* 96(4):11-17. doi: 10.1108/02635579610117467.
- Picht, Carolin-Luise. 2021. « Product Lifecycle Management and Engineering Change Management: Teaching Siemens Teamcenter To Students And Professionals ». Johannes Kepler University Linz.
- Pilehchian, Behzad, Sheryl Staub-French, et Madhav Prasad Nepal. 2015. « A Conceptual Approach to Track Design Changes within a Multi-Disciplinary Building Information Modeling Environment ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 42(2):139-52. doi: 10.1139/cjce-2014-0078.
- Pourzarej, Hamidreza, Louis Rivest, et Conrad Boton. 2020. « Cross-Pollination as a Comparative Analysis Approach to Comparing BIM and PLM: A Literature Review ». P. 724-37 in *Product Lifecycle Management Enabling Smart X*. Vol. 594, IFIP Advances in Information and Communication Technology, édité par F. Nyffenegger, J. Ríos, L. Rivest, et A. Bouras. Cham: Springer International Publishing.
- Quintana, Virgilia, Louis Rivest, Robert Pellerin, et Fawzi Kheddouci. 2012. « Re-Engineering the Engineering Change Management Process for a Drawing-Less Environment | Elsevier Enhanced Reader ». *Computers in Industry*. P.70-90 <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.10.003>
- Raynes, Michael. 2002. « Document management: is the time now right? » *Emerald* 303-308. <https://doi.org/10.1108/00438020210441858>
- Riviere, A., C. DaCunha, et M. Tollenaere. 2003. « Performances in Engineering Changes Management ». P. 369-78 in *Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, édité par G. Gogu, D. Coutellier, P. Chedmail, et P. Ray. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Rouibah, Kamel, et Kevin R. Caskey. 2002. « Change Management in Concurrent Engineering from a Parameter Perspective ». *Computers in Industry*, 50, 15-3.
- S. Ahmad, Hesham, Issa M. Bazlamit, et Maha D. Ayoush. 2017. « Investigation of Document Management Systems in Small Size Construction Companies in Jordan ». ScienceDirect.
- SmartUse. 2022. « Construction App for Blueprints and Documents Sharing ». SmartUse. Consulté 29 août 2022 (<https://suse.wpengine.com/>).

- Stark, John. 2015. *Product Lifecycle Management (Volume 2): The Devil Is in the Details*. Springer.
- Stark, John. 2020. *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Fourth edition. édité par J. Stark. Springer International Publishing.
- Succar, Bilal. 2009. « Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders ». *Automation in Construction* 18(3):357-75. doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.003.
- Sun, Ming, Andrew Fleming, Sepani Senaratne, Ibrahim Motawa, et Mei Lin Yeoh. 2006. « A Change Management Toolkit for Construction Projects ». *Architectural Engineering and Design Management* 2(4):261-71. doi: 10.1080/17452007.2006.9684621.
- Tavcar, Joze, et Jože Duhovnik. 2006. « Engineering Change Management in Distruted Environment with PDM/PLM Support ». *Manufacturing the Future, Concepts - Technologies - Visions*, ISBN 3-86611-198-3, pp. 908, ARS/plV, Germany
- Terzi, Sergio, Abdelaziz Bouras, Debashi Dutta, Marco Garetti, et Dimitris Kiritsis. 2010. « Product lifecycle management - From its history to its new role ». *Int. J. of Product Lifecycle Management* 4:360-89. doi: 10.1504/IJPLM.2010.036489.
- Tornincasa, Stefano, Francesco Di Monaco, Although in Dr Patrick J, et Hanratty Developed Pronto. 2010. « The Future and the Evolution of Cad ». *International Research/Expert Conference" Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, 14th.
- Underwood, Jason, et Umit Isikdag. 2009. *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies: Concepts and Technologies*. IGI Global.
- Watts, Frank B. 2011. *Engineering Documentation Control Handbook: Configuration Management and Product Lifecycle Management*. William Andrew.
- Wright, I. C. 1997. « A Review of Research into Engineering Change Management: Implications for Product Design ». *Design Studies*, 18, 33-42.
- Xu, X. William, et Tony Liu. 2003. « A Web-Enabled PDM System in a Collaborative Design Environment ». *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19, 315-28.
- Zhao, Zhen Yu, Qian Lei Lv, Jian Zuo, et George Zillante. 2010. « Prediction System for Change Management in Construction Project ». *Journal of Construction Engineering and Management* 136(6):659-69. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000168.