MAQUETTES NUMÉRIQUES COMME OUTIL DE PRÉVENTION ET D'AIDE A LA DÉCISION EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL

par

Christian TIAYA TEDONCHIO

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE EN GÉNIE DES RISQUES DE SANTÉ ET DE SÉCURITÉ DU TRAVAIL
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 12 SEPTEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique 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. Louis Rivest, codirecteur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme Ornwipa Thamsuwan, présidente du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Éric Wagnac, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Guèvremont, examinateur externe
Ingénieur et chargé technique chez Hydro-Québec

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

LE 31 AOÛT 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire de maîtrise porte sur les résultats des travaux de recherche menés au Laboratoire de génie de facteurs humains appliqués de l'École de technologie supérieure de Montréal sur le sujet « *Maquettes numériques comme outil de prévention et d'aide à la décision en Santé et Sécurité du Travail* ».

Ce projet de recherche est le résultat d'une collaboration entre l'École de technologie supérieure de Montréal et un partenaire industriel. Il a par ailleurs été financé par le concours du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et celui du partenaire industriel de ce projet. Sa cible est l'amélioration continue de la sécurité et du bien-être des travailleurs de la phase d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels.

De ce fait, ces travaux de recherche ne se limitent pas à la prévention d'un type de risques particulier. Cependant, par souci de clarté et compte tenu des priorités du partenaire industriel, nous avons choisi dans cette étude, de présenter les résultats sous forme d'article de revue avec comité de lecture, portant essentiellement sur l'utilisation des résultats pour la prévention des risques liés aux sources d'énergie au cours de l'exploitation et de la maintenance des ouvrages industriels.

Il est cependant à noter que les ouvrages industriels présentent d'autres risques critiques de sécurité du travail tels que les risques de chutes, les risques liés aux véhicules en mouvement, les espaces clos, les opérations de levage, etc. La démarche de prévention que nous proposons à travers cette étude pourrait être adoptée pour la prévention par la conception de ces autres risques critiques de sécurité du travail des ouvrages industriels.

Par ailleurs, le choix de présenter ce mémoire de recherche sous forme de mémoire par article a impliqué pour nous de le rédiger en deux langues. Les chapitres portant sur la revue de littérature, la méthodologie de recherche, les recommandations et pistes de développement futures ont été rédigés en français. Le chapitre présentant l'article de revue qui a été soumis est, quant à lui, rédigé en anglais.

REMERCIEMENTS

Ces deux dernières années à l'École de technologie supérieure de Montréal ont été pour moi très enrichissantes aussi bien pour ma formation académique que pour mon développement personnel. Ceci n'aurait pas été possible sans le précieux support de ma directrice de recherche, Professeure Sylvie Nadeau et mes codirecteurs, les Professeurs Conrad Boton et Louis Rivest. Je me dirais toujours avoir été très chanceux, de pouvoir apprendre à vos côtés. Je tiens à vous remercier pour toute la patience et la générosité avec laquelle vous m'avez toujours apporté du support sous diverses formes. Je vous remercie particulièrement pour toutes les connaissances scientifiques que vous m'avez aidé à acquérir au cours de ma maitrise. Merci de m'avoir aidé à cultiver de belles qualités personnelles telles que la discipline dans le travail, la patience, la rigueur et l'amour du travail bien fait.

Par ailleurs, je n'aurais pas été capable de poursuivre mes études de maitrise sans l'appui financier du CRSNG et celui du partenaire industriel qui, par ailleurs, à travers le comité restreint de suivi de mon projet de recherche, nous a permis d'une part de garder les yeux fixés sur l'utilisabilité finale de nos travaux et d'autre part, nous a permis d'acquérir d'importantes connaissances pratiques en lien avec la conception des ouvrages industriels et leur exploitation. Ainsi, au CRSNG, au partenaire industriel et particulièrement à tous les membres des comités restreint et élargi de suivi de mon projet, je dis vivement merci.

Je remercie tous les membres de mon jury de soutenance à savoir, les Professeurs Ornwipa Thamsuwan, Éric Wagnac et Michel Guèvremont, respectivement président du jury, membre du jury et examinateur externe. La qualité de ce travail ne saurait être la même sans votre évaluation, vos remarques et précieuses contributions à son amélioration.

Un merci à tous les étudiants du Laboratoire de génie de facteurs humains appliqués ainsi qu'à ceux du Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS). Grâce à vous, mes journées à l'ÉTS auront été remplies de bonne humeur et de pleins de sourires. Merci pour le soutien moral, les conseils multiples ainsi que pour toutes nos aventures dans la belle ville de Montréal. Je remercie par ailleurs le Groupe de recherche sur l'intégration en

développement durable (GRIDD) pour son appui et notamment l'opportunité que j'ai eu de présenter certains de mes résultats de recherche au colloque Innover-Ensemble en novembre 2021.

Je remercie également tout le personnel de l'École de technologie supérieure. Je remercie particulièrement tout le personnel de la bibliothèque, le personnel du registraire et ceux des services informatiques. A chaque fois que j'ai eu besoin de support, j'ai trouvé une précieuse aide dans vos bureaux.

Je terminerais par remercier mes amis et tous les membres de ma famille qui de près ou de loin ont toujours su me soutenir dans mes projets. Merci à vous d'être toujours là pour moi. Je remercie de manière particulière la mémoire de mon feu père, mon adorable mère, ma précieuse compagne et ma fille, mon trésor. Votre amour toujours me donne des ailes.

Maquettes numériques comme outil de prévention et d'aide à la décision en santé et sécurité du travail

Christian TIAYA TEDONCHIO

RÉSUMÉ

Les maquettes numériques favorisent l'observation des situations de travail futures grâce à la représentation géométrique des produits/ouvrages. En phase de conception, elles présentent la possibilité d'être couplées à des technologies de gestion des connaissances pour l'identification des risques de sécurité du travail. Ces risques sont des risques majeurs lors des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels. Dès lors, le couplage des maquettes numériques aux technologies de gestion des connaissances est une approche qui sied aux besoins de prévention à la source des risques des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels. Par ailleurs, ces approches permettent de combiner le potentiel de visualisation offert par les maquettes numériques à la rigueur des méthodes formelles et structurées d'identification des risques. Parmi ces méthodes structurées, on peut noter les méthodes des arbres de causes, d'analyse des tâches, HAZOP et les listes de vérifications. Ces dernières permettent de garantir la conformité des produits/ouvrages aux règlements de Santé et de Sécurité du Travail (SST) en vigueur.

Au cours de cette étude, nous avons réalisé une analyse comparative des approches de gestion des risques de SST à l'aide des maquettes numériques BIM et PLM. Cette dernière a permis de relever que les outils de vérification automatique des modèles, disponibles à la fois dans les environnements de modélisation BIM et PLM, conviennent à la vérification automatique de la conformité des produits/ouvrages aux règlements de SST. Catia V5 étant le logiciel de modélisation utilisé par les équipes de conception du partenaire industriel, la mise en œuvre des principes de la méthodologie de recherche dite de recherche en conception, nous a permis de tester les outils de vérification automatique disponibles sous Catia V5. Cela nous a permis de proposer une approche d'identification des risques qui consiste à utiliser les codes macro sous Catia V5 pour enregistrer les règles de SST auxquelles les produits/ouvrages doivent se conformer. Cependant ces règles de SST doivent préalablement être : 1) extraites des Guides des Exigences de Maintenabilité et d'Exploitabilité (GEME) des Ouvrages, 2) convenablement reformulées de manière à être compatibles avec la méthode d'interprétation de textes à l'aide de quatre opérateurs logiques : *Requirements*, *Applicability*, *Selection* et *Exception* (méthode RASE), 3) l'interprétation en langage machine par la méthode RASE.

L'analyse de la faisabilité de l'approche proposée s'est faite sur le cas d'étude d'un évacuateur de crues du partenaire industriel. Les risques liés aux sources d'énergie apparaissant comme le risque prioritaire du partenaire industriel pour la phase d'exploitation et de maintenance de ses ouvrages, l'étude de cas a consisté à tenter d'utiliser la démarche proposée pour l'identification

automatique des sources d'énergie sur la maquette numérique. Cette étude de cas a par ailleurs permis d'identifier deux principales difficultés d'opérationnalisation de la démarche proposée. Celles-ci sont liées au besoin : 1) de standardisation de la nomenclature des objets numériques et des procédures de conception et 2) de réserver des couleurs à affecter aux objets numériques en fonction du niveau de risque que ceux-ci présentent pour la sécurité et la santé des travailleurs. Cependant, l'étude de cas a permis de valider la faisabilité de l'approche proposée et, ainsi, la possibilité d'utiliser les maquettes numériques pour éliminer à la source les risques règlementés liés aux travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels.

Au demeurant, les limites de l'approche proposée sont triples : 1) la non prise en compte des effets des interactions et des liens de renforcement entre les risques, 2) l'impossibilité d'anticiper les situations accidentelles non prévues dans les GEME et 3) la non-intégration des interactions entre les humains et les produits/ouvrages à entretenir. A cet effet, nous proposons d'étudier, dans de futurs projets, la possibilité de coupler les maquettes numériques aux méthodes émergentes d'identification des risques telles que la Méthode d'analyse de résonance fonctionnelle (méthode FRAM) ou le Modèle théorique et systémique d'accidents et de processus (méthode STAMP/STPA) pour être en mesure d'identifier les risques liés à des situations accidentelles non prévues dans les GEME et ceux liés aux effets de renforcement entre les risques. Nous proposons, enfin, d'étudier la possibilité d'utiliser le module d'analyse ergonomique de Catia V5 pour intégrer le génie des facteurs humains/ergonomie à la conception des ouvrages et ainsi contribuer à la réduction de la fréquence d'occurrence des risques ergonomiques, susceptibles de générer notamment des troubles musculosquelettiques chez les travailleurs de la phase d'exploitation des ouvrages industriels.

Mots clés : maquette numérique, risque, sécurité du travail, génie des facteurs humains, ergonomie, identification, connaissance, méthode, automatique, règles, Catia V5

Digital mock-ups as support tools for risk prevention and decision-making in occupational health and safety

Christian TIAYA TEDONCHIO

ABSTRACT

Digital mock-ups promote the observation of future work situations through the geometric representation of products/facilities. They can be coupled with knowledge management technologies to identify occupational health and safety (OHS) risks in the design stage. Risks of this type are major risks that present themselves during the operation and maintenance stages of industrial facilities. Therefore, coupling digital mock-ups with knowledge management technologies is one approach that can be taken to prevent at the source risks that are present in the operation and maintenance stages of industrial facilities. Moreover, this approach makes it possible to combine the visualisation benefit digital mock-ups offer with the rigour of formal structured risk identification methods, such as fault tree analysis, job hazard analysis, hazard and operability analysis (HAZOP), and checklists. Checklists in particular make it possible to ensure the products/facilities comply with applicable OHS regulations.

In this study, we carried out a comparative analysis of OHS risk management approaches using Building Information Modelling (BIM) and Product Lifecycle Management (PLM) digital mock-ups. Our analysis revealed that automatic model checking tools, which are available in both BIM and PLM modelling environments, are suitable for automatically checking products/facilities comply with OHS regulations. Since Catia V5 is the software program our industrial partner's designers use, we studied the automatic model checking tools available in Catia V5. We used design science research principles for this task. We then proposed a risk identification approach that involves using macro codes in Catia V5 to record the OHS rules the products/facilities must comply with. However, these rules must first be: 1) extracted from an industrial facility's maintainability and operability requirements guides (MORGs), 2) suitably reformulated so they are compatible with the RASE method, and 3) interpreted into a machine-readable language using the RASE method.

We used a case study of a water spillway belonging to our industrial partner to analyse the feasibility of our proposed approach. Since risks linked to energy sources appeared to be our industrial partner's highest-priority risks in the operation and maintenance stages of its facility, the case study consisted of trying to use our proposed approach to automatically identify energy sources in the digital mock-up. The case study made it possible to identify two main difficulties when it comes to operationalising the proposed approach—1) the need to standardise the nomenclature of digital objects and design procedures, and 2) the need to reserve colours to signal the level of risk digitally represented objects pose for workers' health and safety. However, the case study also enabled us to validate the feasibility of the proposed

approach and, thus, the possibility of using digital mock-ups to eliminate at the source regulated risks associated with the operation and maintenance stages of industrial facilities.

Moreover, the proposed approach has three limitations: 1) it fails to take into account the effects of interactions and reinforcement links between risks, 2) it cannot anticipate situations that are not foreseen in MORGs, and 3) it fails to integrate human factors related to interactions between humans and products/facilities during critical maintenance's tasks. To this end, we propose to study in future work the possibility of coupling digital mock-ups with emerging risk identification methods such as the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) or the System Theoretic Accident Model and Process (STAMP/STPA) to be able to identify the risks associated with situations that are not foreseen in MORGs and the effects of reinforcement links between risks. Finally, we propose to study the possibility of using Catia V5's ergonomic analysis module to integrate human factors engineering / ergonomics in facility design and thus help to reduce the frequency of occurrence of ergonomic risks that are particularly liable to generate musculoskeletal disorders among workers in the operation stage of industrial facilities.

Keywords: digital mock-ups, risk, work safety, human factors engineering, ergonomics, identification, knowledge, method, automation, rules, Catia V5

TABLE DES MATIÈRES

Page

LISTE DES TABLEAUX

Page

LISTE DES FIGURES

Page

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMC	Automatic Model Checking
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
API	Application Programming Interface
ASP	Association Paritaire pour Santé et la Sécurité du Travail du secteur de la construction
BIM	Building Information Modelling
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CNESST	Commission des Normes, de l'Équité, de la Santé et de la Sécurité du Travail
COBie	Construction Operations Building Information Exchange
CRSNG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada
DHM	Digital Human Modeling
DMU	Digital Mock-Up
FRAM	Functional Resonance Analysis Method
FTA	Fault Tree Analysis
GEME	Guide des Exigences de Maintenabilité et d'Exploitabilité

GRIDD Groupe de Recherche sur l'Intégration en Développement Durable

JHA Job Hazard Analysis

HAZOP Hazard and operability analysis

IFC Industry Foundation Classes

INRS Institut National de Recherche et de Sécurité en France

IRSST Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail

KBE Knowledge-Based Engineering

LSST Loi sur la Santé et la Sécurité du Travail au Québec

MORG Maintainability and Operability Requirements Guide

NIOSH National Institute for Occupational Safety and Health

OHS Occupational Health and Safety

OHSAS Occupational Health and Safety Assessment Series

OSHA Occupational Safety and Health Administration

PLM Product Lifecycle Management

PtD Prevention through Design

RASE	Requirements, Applicability, Selection and Exception
SST	Santé et Sécurité du Travail
STAMP	System Theoretic Accident Model and Processes
TQC	Tel Que Construit

INTRODUCTION

Les systèmes de travail sont des systèmes complexes qui présentent des enjeux à la fois sur les plans humains, sanitaires, économiques, juridiques, sociaux et techniques (Corréard, Anaya, & Brun, 2010). Les accidents de travail dans de tels systèmes présentent des conséquences (BIT, 2019 ; Reese, 2017) à la fois calculables (perte de temps, perte de profit, ruine des infrastructures, perte de vie, perte de membres, etc.) et compliquées à estimer précisément (perte de crédibilité, perte de compétitivité des entreprises, etc.). La conscience émergente des coûts directs et indirects de ces accidents de travail et maladies professionnelles pousse les industries à intégrer progressivement la Santé et la Sécurité du Travail (SST) dans leurs modèles de gestion (Jacquetin, 2017). Cette intégration de la SST s'effectue à l'aide des systèmes de gestion traditionnels (e.g. OHSAS 18001), des systèmes de gestion non certifiés (e.g. le lean), des sous-systèmes décisionnels (e.g. les systèmes experts) et des systèmes opérationnels en respectant la hiérarchie des moyens de prévention des risques de SST.

Cette hiérarchie des moyens de prévention est une stratégie de prévention des risques par la conception, initiative du *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) aux États-Unis (Mansdorf, 2019). Elle recommande avant toute chose l'élimination des risques à la source. Cette dernière est l'objet de la Loi sur la Santé et la Sécurité du Travail du Québec (LSST). Elle est également l'objet des principes de prévention des risques de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) en France. Elle s'est répandue progressivement dans les industries de secteurs d'activités différents. Dans l'industrie manufacturière par exemple, elle a conduit des organismes nationaux et internationaux à établir des exigences de prise en compte des préoccupations de SST en phase de conception des machines. On note par exemple la « *Directive européenne 2006/42/CE définissant les principes de conception de la sécurité des machines pour prévenir les risques professionnels* » (de Galvez, Marsot, Martin, Siadat, & Etienne, 2017). Depuis lors, la prévention par la conception a fait preuve d'efficacité et d'efficience pour la communauté scientifique (Desjardins-David & Arteau, 2009 ; European Commission., 2013 ; Jacquetin, 2017).

Par ailleurs, les maquettes numériques se positionnent de nos jours comme des outils technologiques de création, de partage et de gestion des informations sur des produits/ouvrages en phase de conception et tout au long de leurs cycles de vie (Jupp, 2016). Dans la société moderne, ces outils technologiques deviennent progressivement indispensables à la conception et à la réalisation des produits/ouvrages (Brahmi, Hammadi, Aifaoui, & Choley, 2021). Il est dès lors légitime de s'interroger sur les usages qui en sont faits pour la prévention à la source des risques de SST.

Dans la littérature, des travaux permettent de constater que des usages sont faits des maquettes numériques en phase de conception pour la prévention à la source des risques des travaux de construction des ouvrages (Fargnoli & Lombardi, 2020 ; Martínez-Aires, López-Alonso, & Martínez-Rojas, 2018). Cependant, les liens et influences entre la conception des produits/ouvrages, les travaux de maintenance et les exigences de SST sont très peu abordés dans la littérature (Giraud & IRSST (Québec), 2008). En effet, les décisions prises en conception quant au choix des équipements (e.g. le choix du type de garde-corps), à leurs dispositions (e.g. la position d'une aire de récupération des huiles de lubrification par rapport aux sources d'ignition) et à la configuration générale de l'ouvrage (e.g. accessibilité d'une plateforme de travail) ont un impact significatif sur la capacité des travailleurs à effectuer les tâches de maintenance de façon sécuritaire. Dès lors, il apparait judicieux d'évaluer la possibilité d'utiliser les maquettes numériques de conception pour identifier et éliminer à la source les risques de SST des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels.

Pour ce faire, la démarche méthodologique que nous avons adoptée est celle dite du paradigme de la recherche en conception. De manière spécifique, elle a été mise en œuvre à travers : 1) une comparaison des approches utilisant les maquettes BIM et PLM pour la prévention des risques de SST, 2) une comparaison des approches utilisées en phase de conception, et qui utilisent les maquettes numériques pour réaliser automatiquement des analyses de risques à l'aide d'outils traditionnels, tels que les méthodes des arbres de causes, HAZOP, JHA et les listes de vérification, 3) des tests sur les alternatives de solutions qui apparaissaient être les outils de vérification automatique de maquettes disponibles sous Catia V5, 4) la proposition

d'une démarche d'identification des risques de SST des travaux d'opération et de maintenance industriels à l'aide des maquettes numériques et 5) une validation de la faisabilité de la démarche ainsi proposée à l'aide du cas d'étude de la prévention des risques liés aux sources d'énergie sur une maquette d'un évacuateur de crues, préparée sous Catia V5 de Dassault Systèmes.

Ainsi, dans le présent mémoire de maitrise nous présentons, dans le chapitre 1, la revue de littérature, des concepts généraux sur la santé et la sécurité au travail, les méthodes traditionnelles d'identification des risques et une comparaison des approches utilisant les maquettes BIM et PLM pour la prévention des risques de SST. Le chapitre 2 présente les fondements méthodologiques, les méthodes de collecte des données ainsi que les méthodes de traitement des données que nous avons utilisées. Le chapitre 3 présente les résultats de l'étude sous forme d'article de revue portant sur la démarche d'identification des risques que nous avons proposée et, particulièrement, sa mise en application pour la prévention des risques liés aux sources d'énergie, risques majeurs lors des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels. Enfin, dans le chapitre 4, nous faisons quelques recommandations et suggérons quelques pistes de développements futurs.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de présenter la littérature pertinente à notre étude. A cet effet, il décrit les différents aspects de la santé et de la sécurité du travail et introduit les notions de maquettes numériques BIM et PLM en relation avec la gestion des informations sur les produits/ouvrages. Ce chapitre permet d'élucider les contributions des maquettes numériques à la gestion des risques de SST tout en clarifiant les besoins de prévention à la source de la phase d'exploitation qui peuvent être comblés à l'aide de ces maquettes. Enfin, ce chapitre compare les utilisations constatées des maquettes numériques pour la réalisation automatique des méthodes traditionnelles d'identification des risques.

1.1 Les différents aspects de la Santé et de la Sécurité du Travail (SST)

La compréhension du travail est un préalable pour pouvoir le rendre sécuritaire (Guérin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 2007). Les méthodes de gestion des risques de SST adoptées par les entreprises dépendent du sens que chacune d'elles donne au travail (Bourgeois, 2006). Ainsi, il convient de distinguer les différents aspects du travail pour être en mesure d'identifier les contributions des maquettes numériques à la gestion des risques de SST.

1.1.1 Aspects organisationnels de la SST

Toute industrie, quel que soit son domaine d'activités, adopte des processus et des procédures de travail pour être en mesure de produire de la valeur (Reese, 2017). L'aspect organisationnel du travail inclut dès lors aussi bien les paramètres liés à la répartition spatiale et temporelle des activités que les paramètres de définition des procédures standard des opérations. On peut citer entre-autres la gestion du flux de circulation des travailleurs (Blondin-Seguineau, 2007 ; Monod & Kapitaniak, 2003), la prévision des mouvements des divers équipements utilisés (Margossian, 2006), ainsi que des déplacements des matériaux et produits (Blondin-Seguineau,

2007). Plus spécifiquement, la conception des lieux, des processus et procédures de travail devrait permettre de (Blondin-Seguineau, 2007) :

- limiter les déplacements du personnels (déplacements dans les ateliers, entre les aires d'entreposage et les postes de travail, etc.) et,
- optimiser les mouvements de produits (livraisons, manutentions manuelles ou mécaniques) de manière à limiter les risques liés aux croisements des flux de circulations.

Il est important de relever que les aspects organisationnels du travail sont beaucoup plus larges, incluant des facteurs autres tels que les facteurs liés à la sociologie du travail : les modes de communication, les rapports de collaboration entre travailleurs, l'autonomie décisionnelle, les rapports hiérarchiques, etc. Cependant, dans le cadre de ce projet de recherche, nous limiterons les aspects organisationnels du travail aux seuls facteurs en lien avec la répartition spatiale et temporelle des activités.

1.1.2 Aspects environnementaux de la SST

Les aspects environnementaux du travail se rapportent essentiellement aux phénomènes physiques (température, pression, radioactivité, vibrations, bruits, etc.), biologiques et chimiques (micro-organismes et solvants pathogènes) qui sont susceptibles de porter atteinte à la santé des travailleurs (Margossian, 2006). Plus spécifiquement, les déterminants des aspects environnementaux du travail sont :

- la qualité de l'air ambiant (présence de poussières, fumées, vapeurs toxiques, de contaminants, etc.);
- les contraintes climatiques (froid, chaleur, neige, vent, etc.) ;
- l'ambiance sonore du milieu de travail ;
- la présence de radiations ionisantes ou non.

1.1.3 Aspects humains de la SST

Les aspects humains du travail touchent aux sollicitations induites par la rencontre de l'humain avec les activités de l'entreprise (Bourgeois, 2006). Ils impliquent l'étude des interactions entre les tâches et l'humain en percevant ce dernier à la fois sous ses angles mécaniques, physiologiques et psychologiques. Les déterminants du travail sous ses aspects humains sont notamment :

- les exigences énergétiques et musculaires des tâches (Monod & Kapitaniak, 2003);
- les sollicitations posturales et gestuelles (Bourgeois, 2006 ; Monod & Kapitaniak, 2003);
- les facteurs cognitifs tels que les charges d'attention ou les flux d'informations à traiter (Monod & Kapitaniak, 2003).

1.1.4 Aspects technologiques de la SST

La complexification progressive des équipements utilisés dans le cadre du travail a induit l'introduction du concept de système Homme-Machine dans l'industrie manufacturière (Monod & Kapitaniak, 2003). Les aspects technologiques du travail désignent ainsi les différents rapports techniques qui existent entre les travailleurs et les équipements. Ces rapports techniques mettent en évidence (Monod & Kapitaniak, 2003) :

- le mode de fonctionnement de l'humain au travail,
- le mode de fonctionnement des machines/outils/équipements se traduisant par des manifestations susceptibles d'impacter l'humain au travail,
- l'interface Homme-Machine comprenant des signalisateurs et des commandes qui favorisent la communication entre les travailleurs et les équipements.

En effet, la mise en interaction de l'humain avec des machines et des outils dans le cadre du travail implique qu'un potentiel dysfonctionnement ou une défaillance de la machine ou de l'interface peut altérer la santé, la sécurité et le bien-être du travailleur. De façon analogue,

dans le cadre de cette interaction, l'accident peut être lié à l'humain (Larouzée, Guarnieri, & Besnard, 2014) du fait de la perception que celui-ci a de son outil de travail et de son environnement et par conséquent, d'une erreur qui en découle (ratés, mauvaise décision, faute d'attention ou de planification, etc.).

Ayant ainsi présenté les principaux aspects du travail, il est aisé de constater la grande variété de risques auxquels les travailleurs peuvent être exposés. Pour guider les praticiens de la SST dans l'identification de ces risques, des méthodes d'identification des risques ont été développées.

1.2 Les méthodes traditionnelles d'identification des risques de SST

Les méthodes d'identification des risques sont des démarches formelles et structurées (Mansdorf, 2019) qui ont été développées dans le but de guider les analystes de risques en leur permettant de considérer les systèmes dans leurs entièretés, et de se focaliser sur leurs composantes critiques. Par ailleurs dans le cadre de ce projet de recherche, le terme *méthodes traditionnelles* est utilisé en opposition avec le terme *méthodes émergentes* d'identification des risques. On entend par *méthodes traditionnelles*, des méthodes usuelles qui ont déjà été largement utilisées dans diverses industries et qui procèdent essentiellement par décomposition pour l'analyse des risques dans un système (Leveson & Thomas, 2018). Les *méthodes émergentes* quant à elles sont des méthodes systémiques d'analyse des risques qui ont vu le jour au cours de la dernière décennie et dont le développement et le déploiement n'a pas encore atteint son plein potentiel. Il existe une grande variété de méthodes traditionnelles d'identification des risques. Celles que nous présentons ici sont uniquement celles, qui au meilleur de nos connaissances, font l'objet de tentatives d'automatisation dans la littérature.

1.2.1 La méthode des arbres de causes

La méthode des arbres de causes est une méthode qui utilise le raisonnement déductif (Mansdorf, 2019) pour identifier les combinaisons d'événements pouvant conduire à la survenue d'un événement non désiré hypothétique. L'événement non désiré ainsi défini est

unique et est appelé événement de tête. La méthode des arbres de causes permet ainsi de retracer le cheminement vers cet événement tout en retrouvant ses causes initiales (Giraud & IRSST (Québec), 2008). Aussi connue sous des appellations autres telles qu'arbre de défaillance ou arbre de faute (FTA), elle est très utilisée dans les industries chimiques, nucléaires et aéronautiques (Villemeur, 1988). Son principe est le suivant (Villemeur, 1988) :

« *Un événement indésirable peut être représenté graphiquement par la combinaison d'événements de niveaux successifs, connectés par des opérateurs logiques et dépendants tous d'événements de base, indépendants les uns des autres et dont les probabilités d'occurrences peuvent être déterminées* ».

Dès lors, l'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet de déterminer les causes racines des événements non désirés dans un système (Reese, 2017). Cependant, l'efficacité des résultats de cette analyse repose sur le choix des événements non désirés à analyser. Si ces événements sont trop généraux, l'analyse devient impossible à réaliser et s'ils sont trop spécifiques, elle pourrait ne pas refléter les problématiques les plus critiques du système étudié (Villemeur, 1988). Aussi, les causes initiales des événements tels que retracés résultent de scénarios d'accidents imaginés. De ce fait, on ne peut être certain, en fin d'une telle analyse, d'avoir identifiés tous les scénarios possibles et donc les causes initiales correspondantes.

1.2.2 La méthode de « Job Hazard Analysis »

La méthode dite « Job Hazard Analysis » est une méthode d'identification des risques de SST qui utilise le découpage séquentiel des tâches à effectuer et les méthodes de travail pour identifier, pour chaque étape d'une tâche à effectuer, les sources de dangers de toutes sortes (chimiques, biologiques, physiques, etc.) et fournir les mesures de prévention qui s'imposent (Mansdorf, 2019). Elle s'effectue en quatre étapes (Mansdorf, 2019 ; Reese, 2017) :

- le choix des tâches à analyser : compte tenu de la complexité des systèmes à analyser et de la grande variété des tâches qui peuvent y être effectuées, les tâches sujettes au

JHA sont généralement celles que les statistiques des accidents/incidents identifient comme des tâches à hauts risques.

- la division de la tâche en étapes élémentaires : le but de cette phase est d'identifier séquentiellement, par des verbes d'action, ce qui est fait ou doit être fait par le travailleur.
- l'identification des risques : consiste à analyser pour chaque action effectuée, comment la santé et la sécurité du travailleur est impactée par le milieu de travail, les équipements ou les matériaux en présence.
- la sélection des mesures de prévention : il est question ici de faire des choix d'amélioration des conditions du milieu de travail, de substituer les équipements ou les matériaux utilisés ou encore modifier les méthodes de travail de manière à éliminer les risques ou à les réduire.

Cette méthode d'identification des risques n'est pas recommandée pour les revues de conception. Elle convient cependant aux situations où les méthodes de travail sont questionnées et présentent un besoin de mises à jour (Mansdorf, 2019).

1.2.3 La méthode des listes de vérification

Les listes de vérification sont des outils d'identification des risques très utilisés dans l'industrie de la construction. Elles sont également utilisées par les fabricants des machines (notamment au Québec) en phase de conception pour vérifier que leurs conceptions sont conformes aux règlementations en vigueur (Chinniah et al., 2019). Les listes de vérification guident les praticiens de la SST en relevant les éléments critiques qu'ils doivent observer du point de vue des règlements de SST (Mansdorf, 2019). Il en existe de nombreuses variantes qui ont été développées par des organismes différents. Au Québec par exemple, l'ASP Construction (Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction) et la CNESST proposent plusieurs modèles de listes de vérification.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est la méthode d'identification des risques la plus simple, permettant à la fois d'identifier les risques règlementés et de vérifier que les éléments

clés pour la sécurité du système sont présents (Mansdorf, 2019). Son inconvénient majeur est que son succès est déterminé par la complétude de la liste des éléments à vérifier, l'expérience de celui qui analyse le système et ses connaissances des règlementations en vigueur (Mansdorf, 2019).

1.2.4 La méthode d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leur Criticité (AMDEC)

La méthode dite AMDEC est une méthode d'identification des risques par induction (Mansdorf, 2019) très utilisée en sûreté de fonctionnement des installations. Elle est fréquemment utilisée dans l'aéronautique, le nucléaire, le spatial, l'automobile ou encore l'industrie chimique et se réalise en quatre étapes (Villemeur, 1988):

1) recueil des paramètres de définition du système et de ses composants et de ses paramètres de fonctionnement (les fonctions remplies par chaque composant du système);
2) choix des états de fonctionnement du système à analyser (en fonctionnement, en maintenance, en secours, etc.) et identification des modes de défaillances possibles des composantes (e.g démarrage intempestif, ne s'arrête pas au moment prévu, ne reste pas en position, fuite interne, fuite externe, etc.) et des causes correspondantes;
3) évaluation des conséquences potentielles de telles défaillances sur les biens, l'environnement et les travailleurs;
4) choix des mesures de prévention à adopter.

L'avantage de la méthode AMDEC est qu'elle fournit une connaissance approfondie des impacts des défaillances des équipements sur le système (Mansdorf, 2019). Cependant, son succès dépend du choix des états de fonctionnement du système à analyser (Villemeur, 1988) et de l'expérience et des compétences de l'analyste/équipe de revue de conception (Mansdorf, 2019). Par ailleurs, cette méthode n'est pas recommandée pour les systèmes complexes, car elle repose sur l'hypothèse que le système étudié est décomposable et ne tient pas compte des défaillances simultanées d'équipements différents (Mansdorf, 2019).

1.2.5 La méthode « HAZard and OPerability »

Principalement utilisée dans l'industrie chimique, la méthode HAZOP combine le raisonnement déductif au raisonnement inductif pour identifier les modes de dysfonctionnement des équipements analysés et les effets de ces modes de dysfonctionnement sur le système et son environnement (Villemeur, 1988). Cette méthode est fondée sur trois notions :

1) les paramètres : ce sont des caractéristiques des processus qui, lorsqu'ils connaissent une déviation de leurs intentions de conception, sont susceptibles de causer des incidents/accidents (e.g. température, pression, flux, présence d'acide organique, viscosité, etc.);
2) les nœuds : ce sont des points clés dans la configuration de l'usine/système, où les paramètres clés ont des valeurs attendues de par les intentions de conception. Ce sont également des points ou ces paramètres peuvent enregistrer des déviations;
3) les mots-clés : ils guident les experts dans l'identification des causes et effets des déviations. Ils caractérisent les modes de déviations possibles des paramètres (e.g : more than, more of, less than, less of, etc.).

Les étapes de réalisation d'une analyse HAZOP sont les suivantes (Mansdorf, 2019) :

1) définir les intentions de conception des lignes de production et des équipements du système à étudier;
2) associer à ces lignes et équipements des paramètres clés caractérisant leurs fonctionnements;
3) identifier les mots-clés les plus crédibles qui s'appliquent à ces paramètres;
4) déterminer pour chaque déviation les causes possibles et les conséquences;
5) apprécier les risques et choisir les mesures de prévention à adopter.

L'avantage principal de la méthode HAZOP est sa capacité à permettre une analyse complète et approfondie des systèmes (Mansdorf, 2019). Par ailleurs, en limitant les modes de

défaillances des équipements à analyser, cette méthode se présente comme une simplification de la méthode AMDEC (Villemeur, 1988). Cependant, son succès dépend du niveau de précision des plans des usines et de la complétude des informations sur le fonctionnement des équipements et les flux des travaux (Mansdorf, 2019). Par ailleurs, l'utilisation de la méthode est rendue difficile du fait de la difficulté d'affecter des mots-guide de déviation à des nœuds spécifiques du système à étudier (Villemeur, 1988).

Toutes ces méthodes d'identification des risques peuvent être utilisées pour l'identification des risques dans les systèmes physiques. Cependant, l'utilisation de ces méthodes dans les systèmes physiques conduit souvent à l'identification des dangers dont l'élimination requiert la réalisation des travaux de rétro-ingénierie. Par ailleurs, au Québec, la Loi sur la Santé et la Sécurité du Travail recommande la prévention des risques à la source comme le moyen le plus efficace de prévention des risques de SST. Ainsi, il apparait judicieux d'utiliser ces méthodes traditionnelles d'identification des risques, pendant la phase de conception des ouvrages industriels, pour identifier et éliminer à la source, les risques de SST de la phase d'exploitation de ces ouvrages industriels.

Les ouvrages industriels relevant de l'univers BIM par leur nature (infrastructure/bâtiment) et de l'univers PLM par la forte présence des équipements industriels et mécaniques qui les constituent, ces deux types de maquettes peuvent être utilisées pour la conception de ce type d'ouvrages.

Dès lors, il se pose la question de la mise en commun des méthodes traditionnelles d'identification des risques et des approches technologiques de conception des produits/ouvrages BIM et PLM pour la prévention à la source des risques de SST. Il semble ainsi pertinent d'explorer le potentiel d'utilisation des maquettes numériques BIM et PLM pour prévenir, en conception, les risques de SST de la phase d'exploitation des ouvrages industriels. Cependant, avant de procéder à la revue de la littérature se rapportant à l'utilisation des maquettes numériques BIM et PLM pour la prévention à la source des risques de SST, il convient d'introduire quelques notions de base sur les maquettes numériques BIM et PLM.

1.3 Introduction aux maquettes numériques BIM et PLM

Le BIM et le PLM sont des approches technologiques qui comprennent des démarches de modélisation des produits/ouvrages ayant un objectif double (Eastman, 2011 ; Jupp & Singh, 2016) :

- intégrer à la représentation tridimensionnelle du produit/ouvrage toute l'information sur son cycle de vie de manière à optimiser sa qualité lors de sa conception et à réutiliser les informations modélisées au cours du cycle de vie du produit/ouvrage.
- rassembler en une base de données commune toute l'information géométrique et non géométrique définissant le produit, de façon à fournir à tous les acteurs devant intervenir sur ce produit/ouvrage une plateforme de travail et de communication commune.

Ainsi, nous entendons par maquettes BIM, les maquettes tridimensionnelles modélisées dans le cadre de ces approches technologiques, devant servir à l'industrie de la construction (bâtiment ou autre ouvrage) et préparées à l'aide de logiciels dits BIM tels que Revit, ArchiCAD, Allplan, etc. De manière similaire, nous entendons par maquettes PLM, les maquettes tridimensionnelles modélisées dans le cadre de ces approches technologiques, devant servir à l'industrie manufacturière (e.g. lignes de productions d'usine, produit automobile, etc.) et préparées à l'aide de logiciels dits PLM tels que Catia de Dassault Systèmes, Tecnomatix Plant Simulation de Siemens, etc.

Présentant des centres d'intérêts communs, le BIM et le PLM présentent des similitudes, mais aussi des divergences dans leurs approches de sauvegarde des informations sur les produits/ouvrages.

1.3.1 BIM et informations sur les produits/ouvrages

Le BIM est l'approche technologique permettant d'optimiser simultanément la qualité des ouvrages, leur mise en œuvre et leur gestion au cours de leur exploitation (Eastman, 2011). A

cette fin, cette approche technologique permet de joindre des informations non géométriques utiles à la réalisation de diverses analyses à la conception géométrique des produits/ouvrages. La gestion de ces informations non géométriques passe par les notions de sémantique et d'attributs des objets numériques.

1.3.1.1 Objets numériques et attributs d'objets

Dans les processus de gestion BIM des projets, les objets numériques sont les objets 3D modélisés assortis d'informations sur leurs caractéristiques géométriques et techniques qu'on appelle communément attributs d'objets. Les attributs géométriques sont bien évidement les caractéristiques dimensionnelles des objets comme les longueurs, hauteurs ou les rayons. Les attributs non géométriques quant à eux peuvent être liés au rôle fonctionnel de l'objet, à une performance (e.g. résistance thermique du matériau constitutif d'un mur, coefficient de transfert de chaleur, etc.), aux liens topologiques avec d'autres objets numériques (e.g. contrainte supérieure ou contrainte inférieure définissant le rapport avec un niveau), à son coût ou autres (Berard & Karlshoej, 2012). Ces derniers confèrent à la maquette une certaine valeur ajoutée (Marchioni, 2018) en lui permettant de se rendre utile à la réalisation de diverses analyses (Ferrise, Bordegoni, & Cugini, 2013).

1.3.1.2 Classification et sémantique des objets numériques

La sémantique des objets numériques se rapporte à la faculté de pouvoir identifier un objet numérique par un nom et de pouvoir, à partir de son identification, conclure sur un certain nombre de propriétés qu'il a hérité des objets parents. Ainsi, il est question, à l'aide de la sémantique, de pouvoir identifier les objets pour ce qu'ils sont (la sémantique vient répondre à la question « c'est quoi cet objet numérique ? ») et, sachant ce qu'ils sont, pouvoir retracer leur « arbre généalogique » telle que celui de la figure 1.1 ci-dessous.

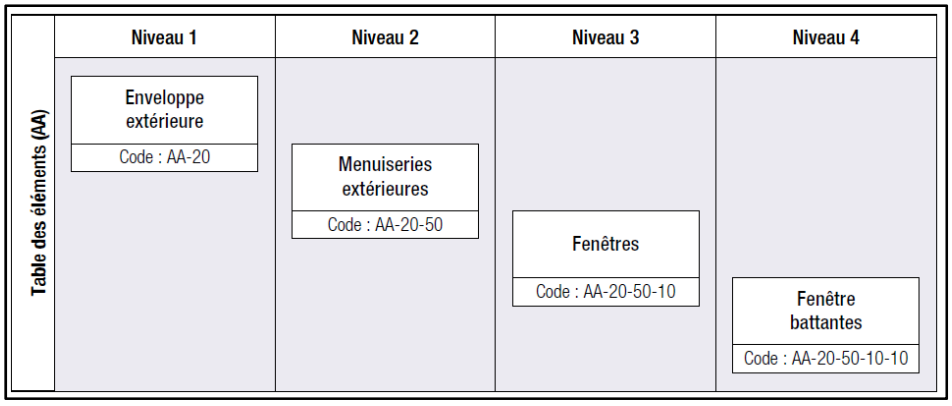

Figure 1.1 Structure type d'une classification d'objets en BIM
Tirée de buildingSMART (2018)

La classification des objets numériques dans le BIM se rapporte ainsi à une sorte de standardisation des dénominations et des rôles fonctionnels des objets numériques pour établir un langage commun visant à faciliter la communication entre les divers acteurs appelés à interagir autour de la maquette numérique tout au long du cycle de vie de l'ouvrage (buildingSMART, 2018). Par exemple, le logiciel Revit donne la possibilité d'associer un attribut de type « fonction » aux objets numériques. La fonction qui est associée à un objet numérique (e.g. fondation) pourra dès lors être incluse dans sa nomenclature. La sémantique apparait désormais comme un intermédiaire entre les maquettes BIM et les structures d'informations hiérarchiques (buildingSMART, 2018).

1.3.2 PLM et informations sur les produits/ouvrages

1.3.2.1 Structure des informations sur les produits

Si la conception des produits/ouvrages est très orientée objet dans l'univers du BIM, le processus de conception dans l'univers PLM vise aussi bien la capture des données modélisées que la capture de la démarche de conception. Ainsi, on peut facilement constater des différences majeures dans la conception et la compréhension des notions d'objets numériques et de hiérarchisation des classes dans ces deux univers de modélisation.

La conception des produits dans les logiciels PLM, et particulièrement Catia V5, est construite autour de l'arbre de spécifications qui permet de structurer les informations sur le produit. Un objet est défini dans ce cas comme un répertoire d'informations sur toute entité présente dans la maquette, qu'il s'agisse d'un simple point, d'un solide ou d'un assemblage de pièces (Dieter Ziethen, 2013). Ces objets sont ainsi associés à des propriétés (caractéristiques géométriques et non-géométriques) et à des méthodes qui sont des instructions pouvant être utilisées pour accéder aux propriétés des objets.

Aussi, la conception étant centrée sur l'arbre de spécification, le regroupement d'objets dans les classes est très différent de ce que l'on peut observer dans le BIM. Dans le BIM, la classification des objets est liée à leurs rôles fonctionnels et à leurs types (*Exemple : Mur, Dalle, Mur de 15 cm d'épaisseur ou mur de 20 cm, etc.*) tandis que dans le PLM, la classification se rapporte à la manière dont les objets sont modélisés les uns à partir des autres (*Par exemple un assemblage qui provient d'une union de diverses pièces*). La hiérarchisation des objets repose donc sur la démarche de modélisation (voir tableau 1.1) et non sur une standardisation prédéfinie comme dans l'univers BIM.

Tableau 1.1 Exemple de hiérarchisation des classes en PLM
Tiré de Dieter Ziethen (2013)

Classe de hiérarchie n	**Solide**
Classe de hiérarchie n+1	Solide basé sur le contour
Classe de hiérarchie n+2	Poche, extrusion

Ainsi, dans une telle maquette numérique, l'accès automatique aux caractéristiques des objets ne repose pas essentiellement sur la sémantique des objets comme dans le cas du BIM. Elle requiert aussi une compréhension de la démarche de modélisation adoptée par les concepteurs.

1.3.2.2 Paramètres intrinsèques et paramètres utilisateurs

Les paramètres intrinsèques d'un modèle de produit se rapportent aux propriétés géométriques des objets modélisés comme la longueur d'une droite ou encore la hauteur d'extrusion d'un

cercle. Ces paramètres sont dès lors liés aux entités élémentaires et on ne peut y accéder qu'en accédant au dernier niveau de la hiérarchie de classification (dans le cas du tableau 1.1 par exemple, les paramètres intrinsèques seront directement liés aux paramètres d'extrusion et donc à la classe de hiérarchie n+2). En d'autres termes, les paramètres intrinsèques associés à une pièce ou à un assemblage ne sont pas toujours facilement accessibles. Si pour vérifier un paramètre intrinsèque associé à une pièce, il faut passer par les paramètres intrinsèques des entités élémentaires qui le constituent, ceci rendrait la procédure un peu plus complexe que celle permettant d'accéder aux paramètres des objets numériques BIM.

Selon le manuel d'utilisateur du module Knowledge Advisor de Catia V5 (Dassault Systèmes, 2009), il est possible pour un utilisateur de définir des paramètres spécifiques appelés paramètres utilisateurs (tableau 1.2). Ceux-ci peuvent être définis aussi bien au niveau hiérarchique de l'assemblage qu'à celui des entités élémentaires. Ils peuvent être associés à la géométrie ou non et peuvent servir à regrouper les objets numériques présentant des caractéristiques communes (tel que le même matériau).

Tableau 1.2 Types de paramètres utilisateurs pouvant être associés aux objets modélisés dans l'univers PLM
Tiré de Dieter Ziethen (2013)

Paramètre de forme	Informations sur la géométrie du produit
Paramètre de précision	Informations sur la mesure et les tolérances du produit
Paramètre technologique	Informations sur les paramètres de performance du produit
Paramètre de matériau	Informations sur les matériaux, composition, traitement et conditionnement
Paramètre d'assemblage	Informations sur les assemblages d'éléments, les orientations d'objets et les relations cinématiques

1.3.2.3 Accès aux informations sur les produits via les API

Les API désignent les interfaces de programmation applicatives (Application Programming Interface). Elles permettent d'accéder aux structures de données des applications logicielles en passant par des langages de programmation dont ces logiciels dépendent ou non. Selon

Bragatto et al. (2007), il est possible d'utiliser les API pour identifier les objets modélisés en fonction de leurs types. Cela peut permettre de se rapprocher de l'approche d'identification des objets numériques par un vocabulaire standardisé comme ce qui a été constaté dans l'univers du BIM.

En effet, dans l'approche proposé par Bragatto et al. (2007), il est question de pouvoir identifier les objets numériques à partir de leurs rôles fonctionnels (e.g. pièce, produit, infrastructure, équipement, etc.) dans la maquette numérique.

1.4 Utilisation des maquettes numériques pour la gestion des risques de Santé et de Sécurité du travail

La grande variété des aspects du travail et la grande variété des types de risques auxquels les travailleurs sont susceptibles d'être exposés conduit à une grande diversification des tentatives d'utilisation des maquettes numériques pour la gestion des risques de SST. Aussi, le cycle de vie des produits/ouvrages étant assez long partant de la conception à la démolition, les approches de gestion des risques de SST varient selon les phases du cycle de vie des projets durant lesquelles elles sont utilisées.

En phase de conception, les maquettes 3D BIM sont utilisées pour la définition géométrique des produits/ouvrages et la conception des sites de construction. Elles permettent ainsi de pouvoir identifier les aires de travail dangereuses et optimiser la répartition spatiale des aires de travail et aires de stockage de manière à limiter les risques de SST (Kasirossafar, Ardeshir, & Shahandashti, 2012). Les maquettes 4D BIM permettent par la suite de visualiser comment ces aires de travail et aires dangereuses évoluent avec le temps de manière à éliminer les risques liés à ces changements (la dynamique) du milieu de travail et optimiser la planification des flux des ressources (Guevremont & Hammad, 2019 ; Shang & Shen, 2016 ; Tran & Pham, 2020 ; Trani, Cassano, Todaro, & Bossi, 2015).

Les maquettes PLM quant à elles sont utilisées pour analyser les interactions entre les humains et les produits et les interactions entre les humains et les tâches (e.g. analyse biomécanique des

activités) en couplant les produits virtuels aux mannequins virtuels (Caputo, Greco, Fera, Caiazzo, & Spada, 2019 ; Illmann, Fritzsche, Leidholdt, Bauer, & Dietrich, 2013) ou aux technologies de réalités virtuelles et réalités augmentées (Peruzzini, Carassai, & Pellicciari, 2017 ; Peruzzini, Carassai, Pellicciari, & Andrisano, 2017). Les maquettes PLM sont par ailleurs utilisées pour analyser les interactions entre les cadences de production et le travail à l'échelle individuelle (Hovanec, Korba, & Solc, 2015 ; Siderska, 2016).

Toujours en phase de conception, les maquettes BIM et PLM peuvent être couplées aux technologies de gestion des connaissances pour prévenir d'autres types de risques. Le couplage des maquettes BIM aux technologies de gestion de la connaissance permet d'effectuer une analyse du travail sous ses aspects environnementaux en identifiant les types de matériaux qui seront manipulés par les travailleurs et les risques auxquels ceux-ci peuvent être exposés du fait de ces matériaux, des équipements utilisés ou d'autres facteurs de risques (Mihić, 2018 ; Mihić, Cerić, & Završki, 2018 ; Zou, Tuominen, Seppänen, & Guo, 2019). Le couplage des maquettes PLM aux technologies de gestion des connaissances permet d'analyser le travail sous ses aspects technologiques et, de ce fait, les effets possibles des dysfonctionnements et défaillances des équipements sur les humains, les biens et l'environnement (Bragatto et al., 2007).

En phase de fabrication/construction, les maquettes BIM peuvent être couplées aux objets connectés et systèmes cyber-physiques pour permettre le suivi en temps réel des déplacements des travailleurs par rapports aux équipements et aires de travail dangereuses (Forsythe, 2014 ; Jiang, Ding, & Zhou, 2020). Ces objets connectés et systèmes cyber-physiques peuvent également être couplés aux maquettes PLM pour permettre le suivi en temps réel du fonctionnement des équipements industriels, produire des alertes de maintenance et ainsi éliminer les risques de dysfonctionnement ou de défaillance de ces équipements (Gröger et al., 2016). Ils peuvent par ailleurs être utilisés comme support pour soutenir les travailleurs en leur fournissant les procédures de travail (Ziegler, Heinze, & Urbas, 2015). Des capteurs peuvent également être utilisés pour recueillir en temps réel les données portant sur les postures de travail adoptées par les travailleurs en vue d'effectuer des analyses ergonomiques sur des maquettes PLM (Joung, Li, & Noh, 2015).

En phase d'opération, les maquettes BIM peuvent être utilisées pour le suivi sur le long terme des informations utiles à la gestion des risques de SST auxquels les ouvrages exposent les travailleurs (Health and Safety Executive, 2018). Par ailleurs, on note la possibilité en fin de construction de transférer, grâce au format COBie des maquettes BIM, les informations sur les risques de SST en présence et de les lier aux procédures de travail en vue de communiquer les risques et les mesures de prévention aux maintenanciers des ouvrages (Wetzel & Thabet, 2018). Dans l'industrie manufacturière, la phase de fabrication des produits correspondant à la phase d'opération des machines de production, la gestion des risques se fait essentiellement en temps réel par le couplage des maquettes PLM aux objets connectés et systèmes cyber-physiques.

Le tableau 1.3 ci-dessous fait une synthèse de ces usages que nous avons pu constater des maquettes numériques pour la gestion des risques de SST en fonction de la phase du cycle de vie au cours de laquelle la maquette est utilisée et des aspects du travail qui sont analysés virtuellement.

Tableau 1.3 Synthèse des utilisations constatées des maquettes numériques pour la gestion des risques de SST

	Conception	Fabrication/Construction	Opération
Aspects organisationnels	Optimisation de la répartition spatiale des équipements sur le site		
	Inspection de l'intégrité des installations		
	Planification des déplacements des ressources		
	Visualisation des changements contextuels du milieu de travail		
	Analyse des interactions processus-humain		
		Suivi et contrôle du déplacement des ressources	
			Planification sécuritaire des tâches via la maquette TQC
Aspects humains	Analyse biomécanique des tâches		
	Analyse des interactions produits - humain		
	Identification des risques par matériaux		
		Analyse biomécanique des tâches	
			Analyse des interactions produits-humain
Aspects environnementaux	Identification des risques par matériaux		
			Suivi sur le long terme des facteurs de risques liés aux ouvrages
Aspects technologiques	Identification des éventuelles conséquences des défaillances des équipements		
	Inspection de l'intégrité des équipements		
			Suivi et contrôle du fonctionnement des équipements
LEGENDE			
	Usage commun aux maquettes BIM et PLM		
	Usage spécifique aux maquettes BIM		
	Usage spécifique aux maquettes PLM		

Une présentation plus détaillée de ces utilisations des maquettes numériques pour la prévention des risques de SST est faite dans l'article de conférence Tiaya, Nadeau, Boton, & Rivest, (2021), en annexe II du présent mémoire. Cet article fait par ailleurs la comparaison des

approches en considérant le type d'informations intégrées dans les analyses de risques et les types de risques gérés par chacune des approches.

Par ailleurs, cette revue des utilisations faites des maquettes numériques BIM et PLM pour la gestion des risques de SST a permis de constater que le couplage des maquettes BIM et PLM à des technologies de gestion des connaissances permet d'intégrer des méthodes traditionnelles d'identification des risques aux maquettes numériques. En d'autres termes, des études récentes tendent à utiliser les technologies de gestion des connaissances en lien avec les maquettes numériques pour réaliser automatiquement les analyses de risques via des méthodes traditionnelles d'identification des risques (Tableau 1.4). Ces approches qui intègrent les méthodes traditionnelles d'identification des risques de SST donnent la possibilité aux concepteurs et experts SST de s'appuyer sur des démarches formelles et structurées qui ont déjà fait preuve d'efficacité dans diverses industries. Ces méthodes traditionnelles leur permettraient entre-autres de focaliser leurs attentions sur les éléments et caractéristiques critiques du système à analyser. Par ailleurs, en enregistrant dans des bases de connaissances des informations utiles à une meilleure compréhension des systèmes à analyser, de leurs fonctionnements et des potentiels risques en présence, ces approches permettent de fournir un grand support aux concepteurs et praticiens de la SST. Dès lors, dans la suite de notre revue de littérature, nous nous focalisons sur ces approches intégrant les méthodes traditionnelles d'identification des risques aux maquettes numériques (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Synthèse des approches intégrant des méthodes traditionnelles d'identification des risques aux maquettes BIM et PLM

Méthode d'identification des risques	Références	Type de maquette numérique
FTA	Zhong & Li, 2015 ; Ding, Zhong, Wu, & Luo, 2016 ; L. Zhang, Wu, Ding, Chen, & Skibniewski, 2013 ; L. Zhang, Wu, Ding, Skibniewski, & Lu, 2016; Zhong & Li, 2015	BIM
		PLM
JHA	Lu, Li, Zhou, & Deng, 2015 ; S. Zhang, Boukamp, & Teizer, 2015 ; Zhang, Boukamp, & Teizer, 2014.	BIM
		PLM
HAZOP		BIM
	Bragatto, Monti, Giannini, & Ansaldi, 2007	PLM
Listes de vérification	Getuli, Ventura, Capone, & Ciribini, 2017; Zhang et al., 2015 ; Zhang, Teizer, Lee, Eastman, & Venugopal, 2013.	BIM
		PLM

1.5 Approches intégrant les méthodes traditionnelles d'identification des risques aux maquettes numériques

1.5.1 Intégration de la méthode des arbres de causes aux maquettes numériques BIM

L'intégration des arbres de causes aux maquettes numériques est traitée par deux approches dans la littérature : l'intégration au moyen des ontologies et technologies de web sémantique (Ding, Zhong, Wu, & Luo, 2016 ; Zhong & Li, 2015) et l'intégration au moyen des bases de données relationnelles (L. Zhang, Wu, Ding, Chen, & Skibniewski, 2013 ; L. Zhang, Wu, Ding, Skibniewski, & Lu, 2016).

1.5.1.1 Présentation de l'approche

La construction des arbres de causes dépend de la capacité à identifier, pour un événement de tête non désiré, les combinaisons d'événements possibles et éventuellement en associant à ces événements leurs probabilités d'occurrence. Il est ainsi question de relier ces événements par des relations de cause à effet. Il est possible d'enregistrer dans une base de connaissance un ensemble de faits appelés facteurs de risques et un ensemble d'événements qui correspondent aux accidents qu'on peut enregistrer dans un système. Ces deux types de concepts peuvent être connectés par des relations sémantiques dans une ontologie (Ding et al., 2016 ; Zhong & Li, 2015) ou par le moyen des bases de données relationnelles (Zhang et al., 2013, 2016).

La possibilité de mise en inférence des informations enregistrées dans ces bases de connaissances avec les informations sur le produit/ouvrage dépend de la manière dont les informations sont enregistrées dans les bases de connaissances. Pour Ding et al. (2016), une ontologie produit/ouvrage doit être créée dans la base de connaissance en suivant la structure des données IFC. En d'autres termes, les concepts représentés dans cette ontologie doivent adopter la même sémantique que les objets numériques BIM et les propriétés semblables. Zhang et al. (2013, 2016), pour leur part, ont développé dans leur approche un module d'extraction des attributs géométriques et non géométriques des objets numériques BIM de façon à les enregistrer sous format eXtensible Markup Language (XML), en suivant la même structure logique d'enregistrement des informations que celle utilisée dans la base de connaissances.

L'avantage de l'approche utilisant les ontologies et technologies de web sémantique est qu'elle permet de déterminer les facteurs de risques initiaux. Cependant, cette approche ne tient pas compte des connecteurs logiques et des probabilités de survenue des accidents de travail. L'approche utilisant les bases de données relationnelles tient compte des probabilités des événements. En revanche, cette approche permet uniquement de déterminer les causes immédiates des événements.

1.5.1.2 Avantages et inconvénients

L'intégration de la méthode des arbres de causes aux maquettes numériques permet de bénéficier de la capacité des arbres de causes d'identifier les risques en précisant les effets de renforcement qui existent entre les facteurs de risques et en permettant d'éliminer les causes racines des événements non souhaités. Elle permet par ailleurs d'identifier aussi bien les facteurs de risques qui relèvent des aspects organisationnels du travail que ceux qui relèvent des aspects environnementaux et technologiques. Cependant, le succès de la méthode des arbres de causes dépend du choix des événements à analyser. De ce fait, le succès de l'intégration de la méthode des arbres de causes aux maquettes numériques est plus difficile à atteindre puisqu'au choix des événements s'ajoute le problème du choix des objets numériques à analyser.

1.5.2 Intégration de la méthode JHA aux maquettes numériques BIM

1.5.2.1 Présentation de l'approche

L'intégration de la méthode JHA aux maquettes BIM est développée par Lu, Li, Zhou, & Deng, (2015) et Zhang, Boukamp, & Teizer (2014, 2015). La méthode JHA reposant sur une décomposition des activités en tâches élémentaires, cette approche décompose les activités de construction telles que présentées sur les chronogrammes d'exécution en tâches élémentaires. Ces tâches élémentaires sont enregistrées dans une base de connaissances (créée par des ontologie et technologie de web sémantique). Dans cette même base, on enregistre les informations sur les risques pouvant être liés aux tâches élémentaires des activités de construction. Ces informations sur les risques sont liées aux informations sur les tâches élémentaires par des relations sémantiques. Par ailleurs, le langage Semantic Web Rule Language (SWRL) permet de coder des règles de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), permettant ainsi d'analyser la conformité des objets numériques modélisés aux règlements de SST. Les informations sur les activités de construction étant liées aux informations sur les types d'objets numériques (enregistrés dans la base de connaissances en suivant les exigences des objets de type Industry Foundation Classes - IFC), il est alors

possible de procéder à une mise en inférence des informations enregistrées dans les bases de connaissances et celles enregistrées dans les maquettes numériques des produits/ouvrages. La mise en inférence d'une telle base de connaissances avec une maquette d'un produit/ouvrage permet de :

- générer, pour chaque objet BIM, des instances dans la base de connaissances;
- récupérer automatiquement les activités de construction de chaque objet BIM et les risques potentiels des tâches élémentaires de construction des instances générées;
- vérifier la conformité du produit/ouvrage à la norme OSHA;
- produire des fiches Excel qui identifient, pour chaque objet BIM, les risques potentiels et les mesures de prévention recommandées.
- visualiser les risques par des images renvoyées aux concepteurs et praticiens SST sur des fichiers Excel.

1.5.2.2 Avantages et inconvénients

L'intégration de la méthode JHA aux maquettes numériques permet de vérifier la conformité des produits/ouvrages aux règlements tout en permettant d'identifier d'autres types de risques liés aux tâches qui pourraient ne pas être règlementés. Cependant, le grand nombre d'objets numériques modélisés dans le cadre des projets de bâtiments industriels, et la grande variété des travaux pouvant être effectués sur ces objets pourraient rendre les résultats d'une analyse difficiles à exploiter. On devra choisir les objets critiques qu'il faut analyser et les activités qui méritent d'être analysées. Ainsi, le succès de l'analyse dépendra de la capacité de ces choix à refléter les problématiques réelles des opérateurs des produits/ouvrages.

1.5.3 Intégration de la méthode HAZOP aux maquettes numériques PLM

1.5.3.1 Présentation de l'approche

L'intégration de la méthode HAZOP aux maquettes numériques a été développée par Bragatto et al. (2007). Il est question dans cette approche d'enregistrer dans une base de connaissances les informations concernant :

- les types d'équipements industriels qu'on retrouve habituellement dans les plans d'usines;
- les différents modes de fonctionnement qui sont habituellement attendus de ces équipements;
- les paramètres qui caractérisent les états de fonctionnement de ces équipements comme la température, la pression, le flux de circulation, etc.;
- les modes de déviations de ces équipements de leurs modes de fonctionnements espérés;
- les conséquences possibles des dysfonctionnements;
- les mesures de prévention à adopter en fonction des cas rencontrés.

Dans cette approche, la mise en inférence de la base de connaissances avec les informations de la maquette numérique est faite par usage des Interfaces de Programmation d'Applications (API) du logiciel de modélisation utilisé. Cette mise en inférence permet d'identifier, pour un plan d'usine, les risques de sécurité machine qui résultent des configurations d'usine choisies.

1.5.3.2 Avantages et inconvénients

L'avantage de cette approche est qu'elle permet d'identifier des risques liés à des situations accidentelles non prévues dans les règlements de SST. Cependant, ces situations accidentelles sont essentiellement celles qui résultent des dysfonctionnements potentiels des équipements. Ainsi, le succès de l'analyse dépendra des choix des équipements pour lesquels les analyses

seront effectuées et des modes de dysfonctionnements à analyser. Ceux-ci pourraient ne pas correspondre aux états les plus critiques du système. A défaut, une analyse complète serait sujette à de nombreuses tâches répétitives (analyser les effets des mêmes modes de dysfonctionnement pour des équipements différents).

1.5.4 Intégration des listes de vérification aux maquettes numériques BIM

Cette approche d'identification automatique des dangers se fonde sur la méthode d'interprétation des textes à l'aide de quatre opérateurs logiques *Requirements, Applicability, Selection et Exception* (méthode RASE) pour la capture de la connaissance de SST dans les textes règlementaires (interprétation sémantique des textes). Elle est proposée comme approche d'établissement des plans de sécurité de chantiers et de vérification de ces plans de sécurité par Getuli, Ventura, Capone, & Ciribini (2017). Toutefois, elle peut être utilisée pour la prévention des risques particuliers comme les risques de chute (Zhang, Sulankivi, et al., 2015 ; Zhang, Teizer, Lee, Eastman, & Venugopal, 2013).

1.5.4.1 Présentation de la méthode RASE

La méthode RASE est utilisée dans l'industrie de la construction comme prérequis à l'utilisation des outils de vérification automatique des modèles (Hjelseth & Nisbet, 2011). Elle sert à la traduction des règles du langage naturel à un langage compréhensible par la machine (Getuli et al., 2017). Plus spécifiquement, elle est utilisée pour l'interprétation sémantique des textes et utilise les quatre opérateurs suivants (Hjelseth & Nisbet, 2011) :

- *Requirements* : C'est l'opérateur qui sert à identifier dans les règles, les éléments/entités qui sont requis. On peut avoir plusieurs alternatives d'éléments requis.
- *Applicability* : C'est l'opérateur qui sert à identifier, dans les règles, les cas dans lesquels les éléments requis sont exigés.
- *Selection* : C'est l'opérateur qui permet d'identifier les spécifications techniques des entités requises dans les cas où ils sont applicables.

- *Exception* : C'est l'opérateur qui définit les cas d'exception.

Ainsi, dans la pratique, cette méthode permet d'analyser les textes règlementaires, de façon à extraire des règles, les objets utiles (comme des dispositifs de protection) qui sont exigés, dans quels cas ils sont exigés, quels sont les spécifications techniques à respecter et les cas d'exceptions. Une fois ces éléments identifiés, il est possible de les rechercher dans la maquette en utilisant les outils de vérification automatique de modèles.

1.5.4.2 Avantages et inconvénients

L'avantage de cette méthodologie est qu'elle permet de s'assurer que les produits/ouvrages conçus sont conformes aux règlements de SST. Ainsi, elle permet de traiter des risques de natures variées. Cette méthode peut permettre de prévenir des risques liés aux différents aspects du travail (principalement organisationnels et environnementaux) en fonction du type de règles que l'on considère en conception. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthodologie est qu'elle ne peut pas permettre d'identifier les risques qui ne sont pas prévus dans les règlements. Par ailleurs, elle ne tient pas compte des effets de renforcement entre les risques.

1.5.5 Comparaison des approches

L'intégration des méthodes traditionnelles aux maquettes numériques pour la prévention des risques de SST peut contribuer à assurer la conformité des produits/ouvrages aux règlements de SST. Elle peut aussi être utilisée pour favoriser l'anticipation sur les situations accidentelles non prévues par les règlements et les meilleures pratiques d'une entreprise. Le type de risques identifiés par cette intégration est fonction de la méthode traditionnelle d'identification des risques utilisée. Or, le choix de la méthode d'identification des risques à utiliser dans un contexte précis est fonction de plusieurs facteurs (Mansdorf, 2019). Par ailleurs, les méthodes d'identification traditionnelles des risques, même lorsqu'elles permettent d'identifier aussi bien les risques règlementés que non règlementés, n'ont pas été développées pour remplacer les règlementations de SST mais pour les compléter (Mansdorf, 2019). Dès lors, dans une

démarche d'intégration de la SST au cycle de vie des produits/ouvrages, il convient de s'assurer dans un premier temps de la conformité de ces produits/ouvrages aux obligations règlementaires (Morvan, 1991) et de pousser les analyses par la suite pour pouvoir prévenir les situations accidentelles non règlementées.

Par ailleurs il ne nous semble pas indiqué, du point de vue de la prévention des risques de SST, de présenter une des approches de la section 1.5 comme étant la plus efficace pour l'identification des risques en conception. En effet, du point de vue de la prévention des risques de SST, il n'est pas judicieux de présenter une approche qui permet d'identifier et de prévenir des risques règlementés comme meilleure qu'une approche qui permet d'identifier des risques non règlementés et vice-versa. De façon analogue, on ne pourrait en faire autant pour une approche qui permet essentiellement d'identifier des risques directs et d'une approche qui permet d'identifier les risques indirects en traitant des interactions entre les risques. Ces approches sont complémentaires. Ainsi, les points forts des certaines approches serviraient à combler les points faibles des autres. Il s'agirait donc d'effectuer une triangulation de ces approches afin de pouvoir identifier et réduire les risques qui sont non réglementés et ne font pas l'objet d'un consensus scientifique. Une telle triangulation serait utile à la réduction des risques auxquels un produit/ouvrage est susceptible d'exposer les travailleurs au cours de son exploitation.

Cependant, avant d'analyser le cas des risques non règlementés, il convient de s'assurer dans un premier temps de la conformité des produits/ouvrages conçus aux obligations règlementaires. De ce fait, l'approche combinant les listes de vérification aux maquettes numériques par le moyen des outils de vérification automatique des modèles apparait comme l'approche à adopter comme tentative première d'intégration de la SST au cycle de vie des ouvrages industriels. Du point de vue de la praticabilité pour les concepteurs et les praticiens de la SST, cette approche présente l'avantage de favoriser les analyses sur les groupes de produits en les rassemblant par types d'objets numériques. Elle permet aussi de constater visuellement les risques sur la maquette numérique en affectant des couleurs précises aux objets non conformes.

1.6 Question de recherche

La revue de la littérature pertinente à l'étude a permis de relever des usages des maquettes BIM pour la prévention des risques en matière de SST à la phase de conception des travaux de construction des ouvrages. Cependant, on a pu noter que la prévention en conception des risques de SST des travaux d'exploitation des ouvrages est très peu abordée dans la littérature (Tiaya et al., 2021). Cette conclusion est similaire à l'observation faite dans l'industrie manufacturière, selon laquelle la prise en compte, en conception, des préoccupations de SST des travaux de maintenance des machines est très peu abordée dans la littérature (Giraud & IRSST (Québec), 2008). Par ailleurs, avec les évolutions technologiques, il existe, dans les univers BIM et PLM, des outils de vérification automatique des maquettes pouvant servir à prévenir les risques règlementés auxquels un ouvrage est susceptible d'exposer les travailleurs au cours de sa phase de construction.

Cependant, la sécurité des interventions en maintenance sur les produits/ouvrages met en évidence des problématiques de natures variées relevant aussi bien des aspects organisationnels du travail que des aspects environnementaux, humains ou technologiques du travail. Plus encore, la sécurité des travaux d'exploitation et de maintenance industriels repose encore principalement sur les moyens les moins efficace de la hiérarchie de prévention des risques de SST que sont les procédures de travail et le port des EPI (Bugaris, 2017 ; Vescio, Riccobon, Grasselli, & De Angelis, 2015). La Loi sur la Santé et la Sécurité au Travail du Québec recommandant la prévention des risques à la source comme étant le moyen de prévention le plus efficace, la question de recherche que nous examinons dans le cadre de ce projet de recherche est la suivante :

« Quelle serait la démarche appropriée, d'utilisation en phase de conception, des outils de vérification automatique des maquettes numériques, pour éliminer à la source les risques de SST des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels? ».

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons adopté la méthodologie présentée au chapitre 2.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre présente les objectifs de notre étude et la démarche méthodologique adoptée pour atteindre ces objectifs. Il décrit par ailleurs les méthodes de collecte des données utilisées ainsi que les méthodes adoptées pour le traitement des données recueillies. Enfin, il présente la méthode utilisée pour évaluer les résultats de l'étude.

2.1 Objectifs

L'objectif général de notre étude est de proposer une démarche d'utilisation des maquettes numériques pour la prévention à la source des risques de SST des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels. Au terme de la revue de littérature, il a été constaté la possibilité d'utiliser des outils de vérification automatique des maquettes numériques pour atteindre cet objectif.

Par ailleurs, l'étude a été menée en collaboration avec un partenaire industriel. Les données confidentielles reçues de ce partenaire industriel ainsi que les rencontres avec le comité de suivi avec le partenaire industriel ont permis d'identifier les risques liés aux sources d'énergie comme une problématique majeure de la phase d'exploitation et de maintenance des ouvrages de ce partenaire industriel. Aussi, dans le souci de proposer une démarche pratique, utile à ce partenaire industriel, il nous a semblé judicieux de proposer une démarche d'utilisation des maquettes numériques, qui sied au logiciel de modélisation utilisé par les équipes de conception de ce partenaire industriel : Catia V5 de Dassault Systèmes.

Dès lors, les objectifs spécifiques de notre projet peuvent être formulés tel que suit :

- objectif spécifique 1 : identifier les étapes permettant l'utilisation effective des outils de vérification automatique des maquettes pour la prévention des risques de SST;
- objectif spécifique 2 : identifier et comparer les outils disponibles sur Catia V5 qui peuvent servir à la vérification automatique des maquettes;

- objectif spécifique 3 : proposer une démarche d'utilisation de l'outil optimal identifié, pour la prévention à la source des risques de la phase d'opération des ouvrages industriels;
- objectif spécifique 4 : valider la faisabilité de la démarche proposée pour la prévention des risques liés aux sources d'énergie, risques prioritaires du partenaire industriel de notre projet.

2.2 Approche méthodologique : Recherche en conception (Design science research)

La démarche méthodologique que nous utilisons dans le cadre de cette étude est issue du domaine de recherche sur les systèmes d'informations. C'est la méthodologie dite de recherche en conception (design science research). La mise en œuvre de cette méthodologie de recherche est un processus itératif, visant à identifier entre des alternatives de solutions technologiques (des outils, des méthodes, des construits, etc.), la solution optimale pour résoudre un problème important pour des industriels (Hevner, March, Park, & Ram, 2004). C'est une méthodologie de recherche adaptée pour des cas d'études dans lesquels on souhaite développer un nouvel artéfact (outil, méthode, construit, etc.) ou ceux dans lesquels on souhaite utiliser un artéfact existant de manière innovante. La figure 2.1 ci-dessous présente le cadre de la recherche en système d'informations. La méthodologie de recherche en conception correspond aux cas de recherche en systèmes d'informations dans lesquels l'objectif est de développer ou d'implémenter un nouvel artéfact tel que montré par la figure 2.1.

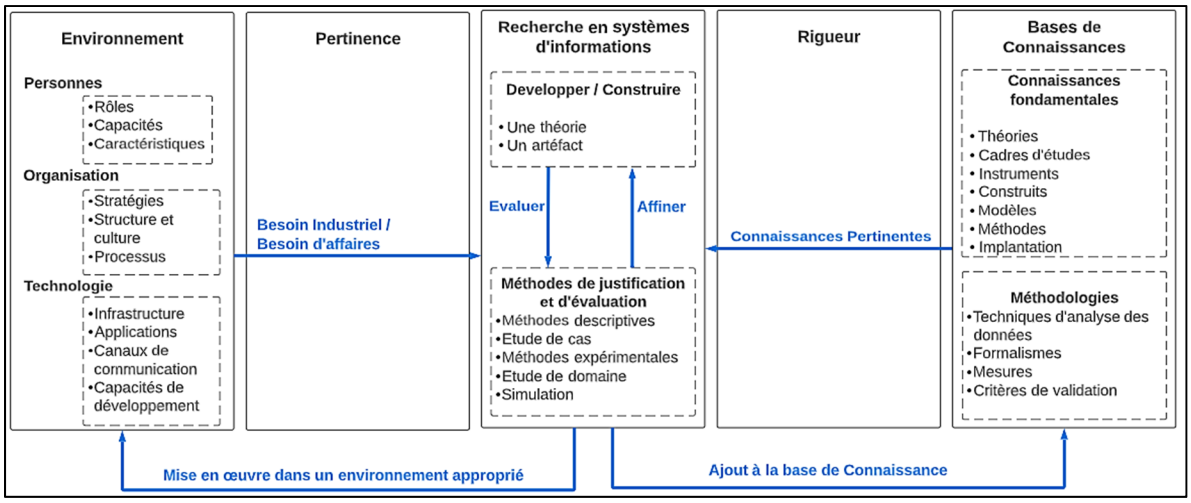

Figure 2.1 La recherche en systèmes d'informations
Tirée et traduite de Hevner et al. (2004)

En relation avec cette figure 2.1, la pertinence de notre projet de recherche repose sur 3 facteurs :

- sur le plan humain, notre étude vise l'amélioration de la qualité des ouvrages industriels conçus de manière à ce que ces derniers soient plus sécuritaires pour les exploitants et maintenanciers;
- encore sur le plan humain, notre projet ambitionne de renforcer les capacités des concepteurs des ouvrages industriels, en leur fournissant une démarche sur laquelle ils pourront s'appuyer, pour identifier automatiquement les risques auxquels ces ouvrages sont susceptibles d'exposer les travailleurs;
- sur le plan organisationnel, le projet vise ainsi une amélioration des processus d'entreprise en matière de prévention des risques à la source.

La qualité des résultats des études menées en recherche en conception est assurée à la fois par la rigueur des méthodes d'analyse des données et par la rigueur des méthodes d'évaluation des solutions proposées. Pour se faire, la mise en œuvre de cette méthodologie requiert la construction d'une base de connaissances fondamentales du domaine d'étude. Dans le cadre de notre projet, la mise en œuvre de cette construction de base de connaissances du domaine d'études, l'analyse des données et l'évaluation des résultats est décrite par la figure 3.1.

2.3 Méthodes de collecte des données

Les données traitées dans le cadre de cette étude sont utilisées pour répondre aux objectifs spécifiques 1 et 2 énoncés à la section 2.1.

Tout d'abord, la qualité de la recherche en conception repose sur la construction d'une base de connaissances fondamentales du domaine d'étude. En effet, c'est cette construction d'une base de connaissances fondamentales qui permet de proposer des outils et démarches qui peuvent être testées par la suite. Ainsi, dans le cadre de notre étude, ces connaissances fondamentales doivent nous permettre de répondre à notre objectif spécifique 1, qui est d'identifier les étapes permettant l'utilisation effective des outils de vérification automatique des maquettes pour la prévention des risques de SST. Pour ce faire, l'acquisition de ces connaissances fondamentales sur l'utilisation des outils de vérification automatique pour la prévention des risques de SST s'est faite par les recherches dans les bases de données scientifiques Compendex et Scopus des articles publiés entre 2010 et 2021, à l'aide des mots clés suivants en anglais : *BIM, PLM, risks, analysis, identification, compliance checking, formal verification, conformance testing, validation, tool and automatic.*

Par ailleurs, l'objectif spécifique 2, consiste à identifier et comparer les outils disponibles sur Catia V5 qui peuvent servir à la vérification automatique des maquettes. Cette vérification de conformité est relative aux exigences de santé et de sécurité au travail auxquelles doivent se conformer les produits/ouvrages. Dès lors, les données utilisées à cet effet sont essentiellement des données confidentielles reçues du partenaire industriel. Il s'agit des données sur les ouvrages industriels types, conçus et exploités par ce partenaire industriel. Les principales données que nous avons utilisées sont les règles de SST relatives à la sécurité des travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages du partenaire industriel. Ces règles de SST sont consignées dans des documents appelés GEME. C'est de ces derniers qu'ont été extraites les règles de SST qui ont servis à tester les outils de Catia V5 en vue de la comparaison de leurs capacités à servir à la vérification automatique de la conformité des maquettes.

Par ailleurs, les autres données essentielles à l'étude ont été la maquette numérique 3D d'un évacuateur de crues qui a servi à l'étude de cas et les manuels d'entretien et d'exploitation d'un autre évacuateur de crues du partenaire industriel.

2.4 Méthodes de traitement des données

Les données recueillies des bases de données scientifiques sont traitées grâce à l'analyse de contenu. L'analyse de contenu tel que défini par Leedy & Ormrod (2015) est une méthode de recherche dont le but est de procéder à une analyse systématique d'un ensemble de documents d'un type prédéfini, en vue d'en relever des tendances ou des caractéristiques particulières. Elle peut être combinée à d'autres types de méthodes de recherche pour atteindre des objectifs spécifiques. Par exemple pour le traitement des données, on peut la combiner à une analyse descriptive ou à une analyse statistique en fonction des objectifs que l'on souhaite atteindre (Leedy & Ormrod, 2015). Ainsi, pour l'identification des étapes nécessaires à l'utilisation des outils de vérification automatique des modèles pour la prévention des risques de SST, nous analysons systématiquement les documents portant sur ce sujet en décrivant les étapes que ceux-ci mettent en œuvre. Cette analyse de contenu nous permet de relever les tendances communes dans ces utilisations des outils de vérification automatique et nous appuie dans la proposition d'une démarche d'identification des risques.

Par ailleurs, les autres données à traiter étant celles de l'ouvrage industriel contenues dans la maquette 3D Catia et les règles de SST extraites des GEME, le traitement de ces données consiste, dans notre étude, à réaliser des tests de vérification automatique de conformité sous Catia V5. Se faisant, nous avons la possibilité d'apprécier les fonctionnalités et les capacités des outils de Catia V5 à vérifier la conformité des maquettes conçues aux règlements de SST. Par ailleurs, ces tests nous permettent de relever des difficultés de mise en œuvre de la démarche d'identification des risques de SST que nous proposons.

2.5 Évaluation des résultats

Dans le cadre de la recherche en conception, la qualité de la recherche est assurée, entre autres, par la mise en œuvre de méthodes rigoureuses pour l'évaluation/validation des résultats. Dans le cadre de notre projet de recherche, la méthode d'évaluation que nous avons adoptée est une étude de cas.

L'étude de cas est une méthode de recherche permettant aux chercheurs d'adopter une perspective constructiviste, de manière à observer et analyser le comportement des objets, théories ou phénomènes étudiés dans des contextes bien spécifiques (Gagnon, 2012). D'autre part, l'étude de cas permet de garantir l'utilisabilité des connaissances ou des construits produits grâce à l'observation, en contexte réaliste de leurs manifestations estimées (Gagnon, 2012). De ce fait, l'étude de cas permet d'optimiser la compréhension en contexte réaliste, du mode de fonctionnement de l'objet étudié, des questionnements que cet objet est susceptible de susciter, de ses limites, etc.

Notre méthode d'évaluation vise la validation de la possibilité d'utiliser la démarche proposée pour prévention des risques de SST de la phase d'exploitation des ouvrages industriels et d'en identifier les difficultés de mise en œuvre. Le choix de l'étude de cas comme méthode d'évaluation permettra d'assurer une forte validité interne de ce résultat (démarche de prévention proposée), en permettant de :

- construire une bonne compréhension de la manière dont la démarche de prévention fonctionne lorsqu'elle est utilisée sur une maquette numérique d'un ouvrage industriel (observation des manifestations estimées de la mise en œuvre de la démarche de prévention proposée);
- identifier les étapes de la démarche qui sont difficiles à mettre en œuvre;
- déduire les significations et les causes de ces difficultés de mise en œuvre;
- faire des recommandations visant à optimiser la démarche de prévention proposée.

De manière spécifique, pour se conformer aux contraintes industrielles, nous nous intéressons dans le chapitre 3 aux risques liés aux sources d'énergie, risques prioritaires du partenaire industriel de notre projet.

CHAPITRE 3

DIGITAL MOCK-UPS AS SUPPORT TOOLS FOR PREVENTING RISKS RELATED TO ENERGY SOURCES IN THE OPERATION STAGE OF INDUSTRIAL FACILITIES THROUGH DESIGN

Christian Tiaya Tedonchio[a], Sylvie Nadeau[b], Conrad Boton[c], Louis Rivest[d]

[a, b] Département de Génie mécanique, [c] Département de Génie de la construction,
[d] Département de Génie des systèmes, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, Canada, H3C 1K3

Article soumis pour publication dans « Results in Engineering », août 2022

Ce chapitre présente les résultats de nos travaux de recherche sous forme d'article de revue avec comité de lecture, soumis à la revue internationale *Results in Engineering* le 29 août 2022.

En effet, au cours du déroulement de notre recherche, après la proposition d'une démarche de prévention des risques de SST à l'aide des maquettes numériques, nous avons tenté d'utiliser cette démarche sur la maquette Catia V5 d'un évacuateur de crues. Les règles de SST auxquelles les ouvrages du partenaire industriel doivent se conformer ont été extraites des GEME. Nous avons obtenu au total 84 règles de SST se rapportant aux risques critiques de sécurité du travail et aux risques ergonomiques du partenaire industriel.

Ces règles de SST ont été classées selon leur potentiel d'automatisation et priorisées de manière à tenir compte des difficultés de mise en œuvre de l'automatisation, de l'impact sur la SST des travailleurs (dommages associés à la violation d'une règle), de l'impact sur la charge de travail des concepteurs (N.B : Dans le cadre de notre étude nous avons restreint la charge de travail des concepteurs au nombre d'instances d'objets à vérifier.) et des risques à la

tolérance zéro à la Commission des Normes, de l'Equité, de la Santé et de la Sécurité du Travail (CNESST).

Cette priorisation des règles de SST auxquelles les ouvrages industriels doivent se conformer a permis de relever le caractère prioritaire des risques liés aux sources d'énergie au cours des travaux d'exploitation et de maintenance industriel. Dès lors, bien que l'étude de cas ait permis de valider la possibilité d'utiliser l'approche préconisée pour la prévention des risques de sécurité au travail de natures variées, nous avons choisi de focaliser cet article de revue avec comité des pairs autour des risques liés aux sources d'énergie.

Abstract

Building information modelling (BIM) and product lifecycle management (PLM) technologies provide automatic model checking (AMC) tools that can be used for the prevention of occupational health and safety (OHS) risks through design (PtD). Considering that the risks related to energy sources during the operation stage of industrial facilities can be major, our objective is to propose a PtD approach for this type of risk that uses AMC tools. For this purpose, our methodology is based on the information systems design-science paradigm. Considering that both BIM and PLM mock-ups can be used to design industrial facilities and that Catia V5 is one of the main software programs used to design industrial equipment and facilities, our methodology specifically includes a comparative literature review of the uses of AMC tools to check BIM and PLM mock-ups and a comparative study of the OHS risk prevention capabilities of the AMC tools available in Catia V5. Therefore, the PtD approach that we propose is specific to Catia V5. It consists of: 1) extracting rules related to hazardous energy control from regulatory requirements and classifying them according to their automation potential, 2) expressing the rules in a form that is compatible with the RASE method, 3) interpreting the rules using the RASE method, and 4) using a macro script to automatically check the compliance of the digital mock-ups. The proposed approach's contribution is that it makes it possible to support facility designers in automatically identifying hazardous energy sources in systems. In future studies, we intend to couple this PtD approach

with methods that integrate dynamic system behavior to assess the level of risk corresponding to the hazardous sources identified.

Keywords: prevention through design (PtD), building information modelling (BIM), product lifecycle management (PLM), digital mock-up (DMU), occupational health and safety (OHS), operation stage, Catia V5

3.1 Introduction

Hazard identification is one of the most important steps in the occupational health and safety (OHS) decision-making process. BIM and PLM technologies are both modern digital technologies that are increasingly used to design products and facilities (Jupp, 2016). They can be used for PtD by facilitating hazard identification (Fargnoli & Lombardi, 2020). Furthermore, the advancement of these digital technologies has led to the development of automatic model checking (AMC) tools, which are digital tools that can be used to process information provided by digital mock-ups (DMUs) using algorithms that record useful information by the mean of checking rules (Hjelseth, 2016). AMC tools have many applications including PtD by reducing the amount of time required for analysis and by supporting designers and in turn limiting errors (Zhang, Teizer, Perez, & McDonald, 2013). AMC tools have been developed in the construction industry to enable public utility companies to validate whether the DMUs they receive comply with building codes (Eastman, Lee, Jeong, & Lee, 2009). Some researchers, like Khan, Ali, Van-Tien Tran, Lee, & Park (2020), propose approaches to use those AMC tools for fire prevention by ensuring that designs comply with related OSHA fire safety requirements. However, in OHS, we can see approaches have been developed to integrate those tools to prevent risks related to excavation or scaffolding (Khan et al., 2020) and they are generally still used mostly to prevent risks related to falls from heights (Hossain, Abbott, & Chua, 2017). Moreover, most of these PtD approaches focus on worker safety in the construction stage of facilities.

Yet, the health and safety of workers in the operation stage of industrial facilities still relies heavily on procedures (Vescio, Riccobon, Grasselli, & De Angelis, 2015), which is one of the

least effective means in the risk prevention measure hierarchy (Bugaris, 2017). Also, some designers have limited knowledge of OHS and therefore encounter difficulties analysing the impacts of their designs on the health and safety of workers in the operation and maintenance stages of the product or facility they are designing (Hossain et al., 2017; Zhang et al., 2013). Consequently, the principles of preventing risks related to the operation stage of industrial facilities through design are not addressed much in the scientific literature, particularly the literature relating to risks in electrical installations (Floyd II & Valdes, 2021). These observations can be made despite the fact that the elimination—at the very source—of risks to the health, safety and physical well-being of workers is addressed in many laws relating to OHS, including Quebec's *Act respecting occupational health and safety*. Since our project was completed in collaboration with an industrial partner based in Quebec, Canada, this elimination of risks at the source is the central point of our study. Moreover, our industrial partner considered the compliance of the industrial facilities designed with Quebec's *Act respecting occupational health and safety* a priority.

Considering that existing AMC tools serve various PtD objectives relating to OHS risks in the construction stage of facilities, the purpose of this study is to propose an approach that uses AMC tools to address risks that are related to the operation stage of industrial facilities when designing the facilities. More specifically, we focus on the risks related to energy sources in this paper since they are one of the major OHS risks in the operation and maintenance stages of industrial facilities. By doing so, our study considers the prevention of risks related to energy sources to be a problem related to the effectiveness of the early management of available knowledge during the design stage of industrial facilities by means of their DMUs. The contribution we are expecting is to provide an approach to validate that the facilities designed comply with requirements regarding the prevention of risks related to energy sources and, in doing so, make it possible to automatically identify regulated risks. Furthermore, our proposed approach must be particularly appropriate for industrial facilities whose DMUs are prepared using Catia V5 computer-aided design (CAD) software. We have specifically chosen to consider industrial facilities designed using Catia V5 because this is the software our industrial partner's designers use.

This paper is organised as follows. We investigate in Section 3.2, the background knowledge regarding the PtD of OHS risks in the operation and maintenance stages of industrial facilities. In Section 3.3, we present the methodology we adopted for this study. In Section 3.4, we analyse the existing design knowledge relating to OHS risk prevention approaches that use AMC tools with DMUs. In Section 3.5, we identify and compare the AMC tools that are available in Catia V5. In Section 3.6, we present our proposed PtD approach. In Section 3.7, we validate the functionality of our proposed PtD approach using a case study of a hydroelectric facility whose DMU was previously prepared using Catia V5. In Section 3.8, we discuss the results of the study. Section 3.9 contains the conclusion and some recommendations for future developments.

3.2 Background knowledge regarding the PtD of OHS risks in the operation and maintenance stages of industrial facilities

3.2.1 Overview of OHS risks in the operation and maintenance stages of industrial facilities

The wide variety of interrelated mechanical systems and industrial equipment that are integrated in industrial facilities makes facilities complex systems that are relevant for both BIM and PLM studies (Fortineau, Paviot, & Lamouri, 2019). Industrial facilities include nuclear power plants (Ciattaglia et al., 2021; Fortineau, Paviot, & Lamouri, 2019), manufacturing systems (Nadeau, Kenné, Emami-Mehrgani, & Badri, 2016; Naeini & Nadeau, 2022; Torres, Nadeau, & Landau, 2021), hydroelectric facilities (Guevremont & Hammad, 2019), chemical plants (Bragatto, Monti, Giannini, & Ansaldi, 2007), and oil and gas platforms (Zhang et al., 2013). They are composed of systems of varied nature that pose many health and safety risks during their operation and require that a structured design approach be used to ensure that the facilities designed meet applicable safety requirements (Ciattaglia et al., 2021). Examples of those risks include safety risks like falls from heights (Wetzel & Thabet, 2018), industrial hygiene risks like chemical contamination or radiation exposure (Ciattaglia et al., 2021) and ergonomic risks (Tiaya, Nadeau, Boton, & Rivest, 2021) linked to insufficient clearance around equipment for maintenance or the postures that are imposed on workers by the layout of equipment.

More specifically, the efficiency, performance and safety of these complex systems require that maintenance tasks be effectively managed, as these tasks are critical to worker safety (Gallab, Bouloiz, & Tkiouat, 2015). Human factors engineering design criteria must therefore be established and considered when designing industrial facilities. These human factors engineering design criteria must be used to ensure that the equipment or systems that are likely to require interventions are accessible (e.g., by providing access routes). They must also be used to limit the movement of hazardous materials (e.g., by optimizing the layout of the industrial facility) or to limit the movement of workers between dangerous areas according to the functional characteristics of the spaces (Ciattaglia et al., 2021). Moreover, they can be used to prevent various types of risks. However, risks related to energy sources are one of the nine types of major risks that need to be controlled in industrial facilities in the energy sector (Guevremont & Hammad, 2019). Thus, the prevention of risks related to energy sources in systems is an important issue for this kind of facility.

3.2.2 Overview of PtD approaches related to the control of hazardous energy sources

Quebec's *Act respecting occupational health and safety* requires that lockout/tagout or any other method of controlling hazardous energy sources be used when work is planned in hazardous areas of systems (Burlet-Vienney, Chinniah, Nokra, & Ben Mosbah, 2021). Standard CSA Z460:20, which applies to the control of risks related to energy sources in Canada, assigns the responsibility for controlling hazardous energy in production systems jointly to the designers, manufacturers, and users of those systems. More specifically, equipment designers are responsible for designing equipment whose hazardous energy can be effectively controlled when humans are interacting with them (Groupe CSA, 2020). However, this recommendation to integrate risk prevention considerations related to hazardous energy sources in system design remains difficult to implement (Hossain et al., 2017). This difficulty probably stems from the fact that the control of risks related to energy sources involves work procedures (e.g., lockout/tagout procedures), the provision of control devices (equipment/machine guarding, interlocking devices, etc.), activity planning and the consideration of various types of energy (Nadeau et al., 2016). The level of difficulty is even

greater for complex sociotechnical systems, which are systems whose components are dynamic and interrelated in synergistic ways to fulfill multiple objectives, and in turn present multiple risks that interact with each other. Therefore, the difficulty to integrate risk prevention in design translates practically into there being a variety of PtD approaches for risks related to energy sources in the scientific literature. This diversity is depicted in Table 3.1, which summarises the PtD approaches identified in the literature for risks related to energy sources in systems.

Tableau 3.1 PtD approaches for risks related to energy sources in systems

Focus of the PtD approach	**Type of risk prevented**	**Authors**	**Country/Region**
Link between system design, production activity planning and lockout/tagout procedures	Risk of sudden energy release	Matsuoka & Muraki, (2001); Vescio et al., (2015)	Tokyo Italy
	Risk of bypassing lockout/tagout procedures and risk of system re-energization during maintenance	Badiane, Nadeau, Kenné, & Polotski, (2016); Emami-Mehrgani et al., (2013)	Canada Canada
Design of interlocking and other devices to verify system de-energization	Risk of contact between humans and energized system components	Bugaris (2017); Poisson, Chinniah, & Jocelyn (2016)	United States Canada
Link between design parameters and hazardous energy types	Risk of sudden energy release	de Galvez, Marsot, Martin, Siadat, & Etienne (2017)	France

3.2.2.1 Integration of concerns related to lockout/tagout procedures in design

Some studies have proposed approaches to integrate the prevention of risks related to energy sources in system design by taking into consideration concerns related to lockout/tagout procedures (Badiane et al., 2016 ; Emami-Mehrgani et al., 2013 ; Matsuoka & Muraki, 2001 ; Vescio et al., 2015). According to Nadeau et al. (2016), there are two ways to integrate lockout procedures considerations: by integrating them in the design of production plants and by integrating them in production capacity planning.

Matsuoka & Muraki's (2001) approach integrates lockout procedures concerns in the design of production plants. It uses data from the CAD drawings of the factories to identify the energy cut-off points, the production lines connected to these points, the minimum areas to be isolated and the minimum number of lockout devices required per piece of equipment or isolated area. Vescio et al.'s (2015) approach is similar to that of Matsuoka & Muraki (2001) in that it aims to identify the energised system components and to provide for their behavior when the system's operating state changes. This approach can support designers of complex systems in implementing PtD by providing them with a way to join simple rules (arising from laws, standards and scientific consensus aimed at ensuring the safety of system operation and maintenance work) and a graphical aid (by means of a Petri Net mathematic model) to better understand lockout/tagout requirements, how system components operate and what controls are needed.

Badiane et al. (2016), for their part, integrate lockout procedures concerns in production capacity planning in their approach, which incorporates the prevention of risks related to energy sources in system design over time. Thus, if we consider a single machine in a manufacturing plant, their approach involves taking into consideration the machine's behavior over its lifespan as a hybrid process and using a stochastic optimal control methodology to integrate production, maintenance and lockout/tagout. This approach makes it possible to allow for the time required for lockout/tagout and thus reduce the risk of the machine re-energising during maintenance or repair. Emami-Mehrgani, Kenné, & Nadeau (2013) propose an approach that integrates the prevention of risks related to energy sources in system design over

space and time. They propose a production flow control approach for a manufacturing system that involves integrating lockout/tagout as a corrective maintenance activity. This approach combines analytical modelling of the production system, digital modelling of the system using numerical calculation software and the response surface method.

3.2.2.2 PtD through the provision of isolation and control devices

The ability to effectively control the energy of a system's components is conditioned by the ability to identify and provide adequate isolation devices. Moreover, the standards recommend that these devices be lockable so that their state cannot be changed unintentionally. However, isolation/lockout devices can still be installed incorrectly or deliberately not installed by workers (Mick, Means, Etherton, Powers, & McKenzie, 2005). To overcome this shortcoming, new control devices have been designed that can be integrated in systems to verify lockout/tagout procedures are completed during system's operation. Some studies have therefore focused on designing source isolation and other useful control devices that can be integrated into a system's design (Bugaris, 2017; Poisson et al., 2016). Bugaris (2017) focuses on applying PtD to enhance safety during system's operation by verifying the absence of voltage in systems. They propose to embed in a system's design permanent devices that automatically test the voltage and establishes functional requirements for these devices to be beneficial for risk prevention at the source. Poisson et al. (2016), for their part, propose an approach to design a safety control system that can be integrated in the power circuit of machines to prevent risks related to energy sources when verifying the absence of energy during the lockout procedure.

3.2.2.3 PtD through the recognition of energy sources

Some researchers support that recognising energy sources and assessing risk based on the energy sources identified is a suitable way to support humans performing high-risk activities and allows them to manage the energy sources in a system effectively and efficiently (de Galvez et al., 2017; Song, Awolusi, & Jiang, 2020). In this vein, de Galvez et al. (2017)

propose a PtD approach for occupational safety risks that is based on the functional structural model (FSMo). Their approach consists of translating customer needs or 3D DMUs into functional diagrams that include system components' contact interfaces and probable energy exchanges. Thus, each functional surface is associated with design parameters (e.g., type of energy, material state, shape, position) that are linked to risk assessment parameters by means of logical reasoning trees. However, this approach must be manually applied despite the fact that it uses information (design parameters) that is already embedded in DMUs.

3.2.3 Concerns related to the lockout program and current shortcomings

In addition to the previously mentioned PtD approaches, Karimi, Chinniah, Burlet-Vienney, & Aucourt (2018) define a "lockout program" as a document that provides a framework for the practice of lockout within an organisation in accordance with the regulations in force. They include nine steps in a lockout program, the first four of which are: "*(i) identification of the hazardous energy covered by the program, (ii) identification of the types of energy isolating devices, (iii) identification of the types of de-energising devices, (iv) selection and providing of protective materials and hardware.*" The approaches identified below fall under these initial stages of establishing a lockout/tagout program. However, energy sources, isolating devices, and de-energising and other devices are system components that can be modelled and analysed early in system DMUs. The PtD approaches presented below are mostly based on theoretical mathematical models (Vescio et al., 2015) or remain essentially manual despite using information provided by DMUs (de Galvez et al., 2017) and do not use the DMUs as a risk identification and communication platform.

Therefore, how can the OHS risks facing workers in the operation and maintenance stages of industrial facilities be prevented through design by leveraging the information contained in DMUs and using DMUs like a risk identification and communication platform? And more specifically, in terms of the energy sources that represent major risks during the operation and maintenance stages of industrial facilities, how can we use DMUs to effectively prevent risks related to energy sources during the design stage of these industrial facilities?

In the interest of automatically using the information embedded in DMUs to improve OHS outcomes, Zhang et al. (2013) consider that occupational health and safety regulations and standards make it possible to integrate constraints related to human factors engineering into design by standardising the safety requirements related to equipment, products and processes. This integration of useful knowledge (e.g., safety requirements) into design can be achieved by means of DMU AMC tools, which use algorithms to effectively manage the knowledge applicable to the facilities designed (Hjelseth, 2016). Leygonie, Motamedi, & Iordanova (2022), on the other hand, propose an approach that supports the idea that BIM mock-ups are of limited use when managing the operation and maintenance stages of buildings and use AMC tools to check the quality of BIM mock-ups so as to facilitate their use by operators and facilities managers during the operation stage. However, their approach does not target OHS and remains focused on administrative buildings (e.g., office buildings).

Overall, an important question remains about how to integrate in design the control of risks related to energy sources in industrial facilities by means of AMC tools. The methodology proposed next should help answer this question.

3.3 Research Objectives and Methodology

The main objective in this study is to propose a PtD approach for risks related to energy sources in the operation stage of industrial facilities designed with Catia V5 by using appropriate AMC tools. Our initial hypotheses are as follows: 1) DMUs can be used to effectively identify and communicate, during the design stage, the risks related to energy sources in the operation of industrial facilities and, 2) DMU AMC tools can be used to control the risks related to energy sources in the operation of industrial facilities so as to promote the automatic identification of risks in DMUs. Thus, in relation to the above background information, this PtD approach is intended to be a means to leverage DMUs to control the risks related to energy sources in systems. It is therefore intrinsically a knowledge management approach and thus fits into the field of information systems research. However, in accordance with the requirements relating to consideration of human factors in automated systems (CIEHF, 2022), this approach to automatically identifying risks in systems does not aim to replace humans in the OHS decision-

making process, it aims only to support humans by simplifying their tasks related to the acquisition and interpretation of information about the systems designed.

Among the methodologies used in information systems research, the design-science paradigm is an efficient one that requires a reasonable amount of time and resources to develop new practical artefacts for solving problems (Hevner, March, Park, & Ram, 2004; Purao, 2021; Siponen et al., 2021). This methodology is structured by the following seven guidelines (Hevner et al., 2004):

1) The purpose sought must be the development or implementation of a method, model, or tool to serve a specific objective in information systems.
2) This purpose must be relevant and must require a technology-based solution to alter the way a phenomenon occurs in the real world.
3) Rigorous evaluation methods must be used to evaluate the technology-based solution developed. This evaluation therefore varies in accordance with the objectives of the study (e.g., functionality, performance, accuracy, execution time).
4) The study's scientific contribution must be clear and in line with its innovative and relevant character. This contribution can be related to the innovative application of existing knowledge or the creation of knowledge to solve an unsolved problem.
5) In addition to the rigor of the methods used to evaluate the technology-based solutions developed (e.g., a case study), the research methodology must use rigorous methods to develop the technology-based solutions. Therefore, the process to develop the method, model or tool must be iterative so as to constantly assess the implementability and suitability of the proposed technology-based solutions.
6) The iterative nature of design-science research reflects a continuous search for the optimal solution. The need to develop a technology-based solution that works requires, on one hand, that existing knowledge in the field be used to faithfully represent the set of possible solutions and understand when and why they work or do not work, and on the other hand, that alternatives to the chosen constraints be tested to identify the optimal solution.

7) The communication of this type of research must be technology- or management-oriented. In fact, this type of research is beneficial to practitioners through the benefits provided by technology-based solutions developed, and by doing so, it enables the scientific community to extend the application of existing technology-based solutions. It is also geared for a managerial audience because it enables managers to derive the requirements necessary to develop robust tools for their organisations.

The design-science paradigm thus responds to a need to explore information technology's capacity to automate tasks, create knowledge or support processes in a specialised field where the operation of information systems is not yet efficient (Hevner et al., 2004). Moreover, for Purao (2021), the ability to divide an objective into specific objectives that are able to be achieved using available data is a necessary condition for adopting this methodological approach. Choosing this methodology for our study is thus justified by the fact that our objective, which aims to propose a PtD approach for risks related to energy sources, can be divided into specific objectives that can be achieved using data available from scientific databases and industry, including best practices and requirements recorded in industrial facilities' maintainability and operability requirements guides (MORGs).

The specific objectives of our study are: 1) to identify the key steps needed to conduct automatic compliance checking for OHS purposes, 2) to identify and compare the capacities of the AMC tools available in Catia V5 to be used for OHS purposes, 3) to propose an appropriate PtD approach to use in Catia V5, and 4) to validate the feasibility of using this PtD approach to prevent risks related to energy sources in the operation of industrial facilities.

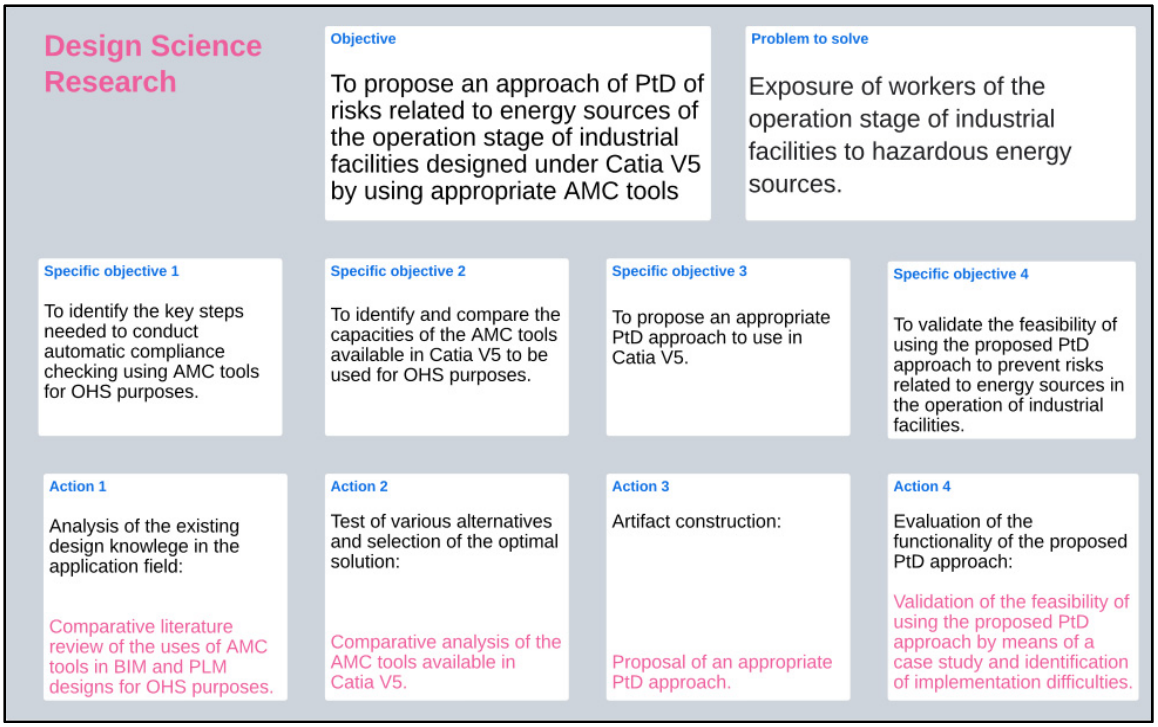

Figure 3.1 Research objectives and methodology

The following steps were taken to achieve the specific objectives:

- Analysis of the literature pertaining to the use of AMC tools for OHS purposes: To this end, we consulted the Compendex and Scopus databases and searched for works published in 2010 to 2021 using the following English keywords: *BIM, PLM, risks, analysis, identification, compliance checking, formal verification, conformance testing, validation, tool* and *automatic*. We selected articles whose objective dealt with using AMC tools to prevent OHS risks of any kind and literature review articles dealing with trends in the use of these tools in the construction and manufacturing industries.
- Comparative analysis of the AMC tools available in Catia V5: To this end, we compared the tools based on our attempts to automate the verification of rules in the DMU that we use in our case study. More specifically, we extracted from the hydroelectric facility's MORG the OHS rules related to objects modeled in the DMU (e.g., rules pertaining to the minimum dimensions of holes to access enclosed spaces or to the amount of clearance that must be maintained around equipment for

operability). We then tried to use each tool available in Catia V5 to verify that the DMU complied with the rule extracted. This allowed us to assess and compare the tools' capabilities.

- Proposal of a PtD approach: In light of the results of our literature review and comparative analysis of the tools available in Catia V5, we propose a PtD approach. The proposed approach represents our technology-based solution whose functionality is evaluated using a case study.
- Validation of the proposed PtD approach using a case study: This step involves extracting the rules pertaining to the control of hazardous energy sources in systems, verifying the feasibility of using the proposed PtD approach to verify the DMU's compliance with these rules and evaluating the approach's functionality.

Besides, we involved a steering committee in our study to find the optimal PtD approach. Two benefits of involving the steering committee were: being able to be assured that the knowledge resulting from the research was relevant for users while processing it, and being able to a priori confirm the usability of the results for users and organisations at the end of the project (Raymond, Leclerc, Parent, & Desmarais, 2009).

3.4 Analysis of existing design knowledge relating to the use of AMC tools in OHS

This section constitutes Action 1 of our methodology, which aims to achieve Specific Objective 1—to identify the key steps needed to conduct automatic compliance checking using AMC tools for OHS purposes. To this end, in this section, we analyse the uses of AMC tools with DMUs to improve OHS outcomes in the construction and manufacturing industries. We then identify the key steps needed to conduct automatic compliance checking using AMC tools for OHS purposes.

3.4.1 Classification of AMC tools and their uses for improving OHS outcomes

The wide variety of regulatory requirements that exist for products and facilities has led BIM and PLM researchers to take interest in using computers to manage knowledge with a view to automating the verification of the quality and performance of the products and facilities designed. There therefore exists a wide variety of AMC tools that have been developed to automatically check DMU compliance for different purposes (Hjelseth, 2016).

In the construction industry, AMC tools are mainly used to check the quality of DMUs in relation to building codes (Eastman et al., 2009). Considering their many and varied applications, Hjelseth (2016) groups them into four categories: "*A) Compliance checking solutions, separated into: 1) Validation checking and 2) Content checking, and B) Design solution checking, separated into: 3) Smart objects checking and 4) Design option checking.*" This classification serves to inform users of AMC tools of the types of rules that can be encoded and the purposes the tools can support. Based on these categories, the types of rules that can be encoded are: 1) standards, codes and best practices, 2) digital specifications like BIM manuals that have been translated into rules, 3) rules that correspond to an object's capacity to change according to its environment, and 4) rules identifying objects in an external database that are suitable for an existing situation. Those categories also indicate that the tools can be used to: 1) check geometry and information, 2) check model completion, 3) check DMU quality throughout the design process, and 4) optimise DMU quality throughout the design process.

In the manufacturing industry, two main approaches are used to verify DMUs and analyse their content (Wu, 2018): a "static" approach during design review and a more "dynamic" approach aiming to support the designer in real time throughout the product design process.

Despite the wide variety of AMC tools that exist and possible applications there are for them, there exist few AMC tools that can effectively help designers identify inconsistencies and conflicts between their designs and OHS requirements (Hossain, Abbott, Chua, Nguyen, & Goh, 2018). Furthermore, almost all of these tools used for OHS purposes focus on preventing

the risk of falling from heights (Hossain et al., 2017). Figure 3.2 below provides a portrait of the literature found on approaches to using AMC tools to improve OHS outcomes.

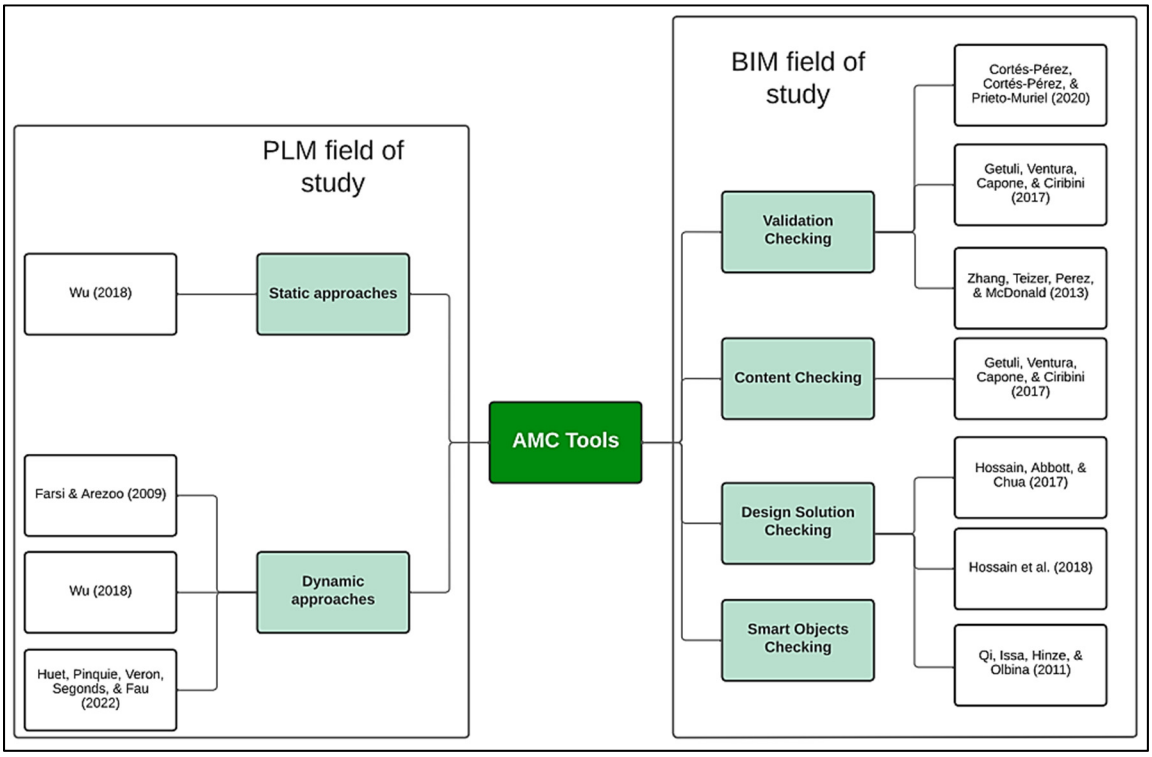

Figure 3.2 Relevant literature on approaches to using AMC tools in BIM and PLM for OHS purposes

In terms of validation checking approaches taken to using AMC tools in the BIM universe, Zhang et al. (2013) developed a tool to identify cases of rule violation in the design of offshore oil platforms. More specifically, they integrated their tool in BIM visualisation tools such as Navisworks to be able to identify non-conformities in the design of walkways used to enter and exit work areas (e.g., narrow track, insufficient head clearance). Cortés-Pérez, Cortés-Pérez, & Prieto-Muriel (2020) used the Dynamo tool to check the attributes of digital objects and identify objects whose construction would expose workers to a risk of falls due to their spatial location. Getuli, Ventura, Capone, & Ciribini (2017) used the AMC tool Solibri Model Checker in their PtD approach to consider risks of various kinds (e.g., risk of falling from heights, risk of collision between workers and construction machinery). They applied the RASE (Requirement, Applicability, Selection and Exception) method to regulations to identify

the physicals objects that are necessary to ensure work site safety. They then generated a virtual catalog of objects that can be used to develop construction site safety plans and used Solibri Model Checker to check the safety plans developed comply with applicable OHS regulations. However, this approach also makes it possible to verify the completeness of BIM mock-ups in terms of the types of documents they must contain (e.g., scaffolding calculation notes). This is why this approach is also considered a content checking tool.

In terms of design solution checking approaches taken in the BIM universe, Qi, Issa, Hinze, & Olbina (2011) proposed a system that comprises a dictionary and a set of OHS rules that are capable of iteratively determining, during the design process, the system components that are non-compliant with the rules recorded. The system they propose makes it possible to iteratively obtain suggestions for modifications relating to OHS requirements in the form of texts during the design process using Solibri Model Checker. Hossain et al. (2017) and Hossain et al. (2018), for their part, proposed to link BIM design platforms with structured rule-based PtD knowledge libraries. They used MySQL to develop PtD knowledge libraries that contain 1) a list of the objects currently modeled in the DMUs, 2) a list of the working conditions those objects impose on workers, 3) a list of the constraints that apply to the parameters of the objects based on the working conditions, 4) a list of the risks that are posed by violating those constraints. As a result, a reasoning engine can automatically compare the parameters of the objects in the DMUs to those of the constraints in the knowledge libraries.

In terms of the approaches taken to using AMC tools in the PLM universe, Wu (2018) developed a system that combines the static and dynamic approaches to automatically verify 3D mock-ups of nuclear power plants using 3D design software from the company AVEVA. Their system uses AVEVA's Programmable Macro Language and Microsoft's .Net Framework and C# language to code a rule repository and a verification process so that the quality of 3D mock-ups can effectively be statically checked by multidisciplinary teams during design review or be checked in real time by designers throughout the design process. However, despite the fact that the approach can be extended to many other 3D modeling software programs (Wu, 2018), it remains general and does not specifically deal with rules related to OHS concerns in the operation and maintenance stages of facilities.

Both Farsi & Arezoo (2009) and Huet, Pinquie, Veron, Segonds, & Fau (2022) without intending to focus on OHS-related aspects of design, proposed dynamic approaches that aim to support designers with constraints and design rules throughout the design process. Farsi & Arezoo (2009) proposed to use Visual Basic to integrate in DMUs prepared using the CAD software SolidWorks 2008 design-for-manufacturability rules for sheet metal components. Huet et al. (2022), on the other hand, take a more comprehensive approach that includes design rules for maintainability and recyclability. They proposed a context-aware design assistant that would be able to establish correspondences between design contexts and applicable design rules. However, the design of their system is still in the conceptual stage.

In the interest of proposing a practical approach, we must analyse the AMC tools that are available in Catia V5 and can be used for automatic compliance checking. However, we must first draw conclusions from the above literature as to which steps are needed to use these tools.

3.4.2 Identification of the preliminary steps needed to use AMC tools

As noted above, the type of rules to be automated influences the type of AMC tools that can be used for automation (Hjelseth, 2016). Eastman et al. (2009) investigated the five main AMC tools used in the construction industry. This study made it possible to determine the functional capacities of those five tools and enabled the authors to identify an implementation process involving the following four steps: 1) logic-based rule interpretation, 2) DMU preparation relative to the objects to be integrated and their properties, 3) rule execution, and 4) rule check reporting. The logic-based rule interpretation step is also used by Zhang et al. (2015). It consists of extracting from written rules the objects that must be modelled, their types and their properties. However, the RASE method used by Getuli et al. (2017) is more general and more structured, and is not limited strictly to the objects required—it can be applied to documents and other specifications that DMUs must contain. This is why this method is useful for both validation checking and content checking. It can also be used for dynamic approaches like smart objects checking.

Rules are not always written in a way that the objects required and their attributes can be directly extracted, however. For Warren & Saleeb (2020), AMC tools' usability and effectiveness for performing compliance checks depend on the quality of the rules used. To this end, they support the idea of generating high-quality machine-readable rule checking using logical annotation operators such as those recommended by Hjelseth & Nisbet (2011). They therefore support using the RASE method.

We must therefore be able to distinguish rules by their automation potential before defining the next step in automatic compliance checking.

3.4.2.1 Rule extraction and classification according to their automation potential

The literature proposes two main ways to classify rules according to their automation potential: that of Nawari (2018) and that of Malsane, Matthews, Lockley, Love, & Greenwood (2015).

On one hand, Malsane et al. (2015) propose to classify rules extracted from a regulatory text into one of three main categories: 1) declarative, 2) informative, and 3) non-interpretable rules. On the other hand, Nawari (2018) proposes to classify rules extracted from a regulatory text into one of four main categories: 1) conditional, 2) content, 3) ambiguous, and 4) dependent rules. This last category—dependent rules—essentially indicates the existence of an interdependent relationship between two rules; the automation potential of dependent rules therefore depends on our ability to automate the verification of the rules on which they depend. Thus, this category corresponds to Malsane et al.'s *informative rule* category. Essentially wishing to be able to deduce a rule's potential to be automated, we chose to use Malsane et al.'s classification in this study. Thus, in the rest of the document, we refer mainly to declarative, informative and non-interpretable rules consistent with Malsane et al.'s classification. These rule types can be defined as follows:

- Declarative rules: These are rules that relate to attributes of modeled objects and can be answered directly with true or false depending on whether or not the attributes meet a target value.

- Informative rules: These are rules whose automatic verification first requires human intervention and reasoning to extract the exact meaning of the rule. It is not possible to directly answer them with true or false.
- Non-interpretable rules: These are rules that are particularly difficult to verify even manually. One example is a rule whose verification requires the performance of in-situ tests or the use of specialised equipment such as atmospheric monitoring devices to work safely in confined spaces.

Since declarative rules are the ones that can be directly automated, the objective would therefore be to have all rules written in declarative form. Thus, after the rules have been extracted and classified, the informative ones must be expressed in declarative form.

3.4.2.2 Expressing informative rules as declarative rules

Both Warren & Saleeb (2020) and Getuli et al. (2017) support the idea that AMC tools' effectiveness for checking DMUs is dependent on using a virtual catalog of objects (e.g., guardrails, handrails, stairs, scaffolding). This object catalog, which is built prior to using AMC tools, is essentially meant to establish a clear connection between the objects required in the DMU and their correct attributes as recommended by regulatory texts.

Thus, object catalog development appears to make it possible to express the rules to be automated as *If then Else* rules to have a clear view of the objects to be searched for in the DMU and the attributes to be checked. It is one way to express informative rules as declarative rules (a declarative rule can be written for each object in the object catalog developed).

However, it is not possible for us to guarantee that developing a catalog of required objects will be sufficient to express every informative rule encountered as a declarative rule. It is necessary to adapt to how the rule is formulated and to the system studied each time.

3.4.2.3 RASE method

According to Dimyadi, Clifton, Spearpoint, & Amor (2014), the RASE method is a structured way to analyse documents by marking relevant information and can be used to extract knowledge from paper-based regulatory documentation for knowledge encoding. Getuli et al. (2017) noted that the RASE method is a semantic analysis method that makes it possible to extract a set of parameter rules from regulations and normative texts in such a way as to make it possible to compare the geometric and non-geometric parameters of the objects modeled on the DMUs with the target values defined in the regulations and texts. Nawari (2018) defined the RASE method as a semantic-based method that provides a formal language to express building rules in the form of objects associated with specification constraints, while also offering the possibility of linking them to a wide variety of DMU content validation and checking tools.

Hjelseth & Nisbet (2011) described the RASE method as applying four types of logic operators to a text in order to translate it into machine-readable language. Those operators are:

- Requirement (R): This operator is used to identify the elements/entities that are required in the DMU according to the rules. It is possible to have several alternate required elements.
- Applicability (A): This operator is used to identify when each required element is necessary according to the rules.
- Selection (S): This operator makes it possible to identify the technical specifications of the required entities when applicable.
- Exception (E): This operator defines exceptional cases.

Since the rules are all in declarative form, this method can be applied prior to using the AMC tool.

3.5 Comparison of the AMC tools available in Catia V5

This section constitutes Action 2 of our methodology, which aims to achieve Specific Objective 2—to identify and compare the capacities of the AMC tools available in Catia V5 to be used for OHS purposes. To this end, in this section, we first describe the criteria that we used to compare the AMC tools available in Catia V5, then present the AMC tools that are available in Catia V5, and finally, present our comparison of those tools.

3.5.1 Tool comparison criteria: Analysis speed and reusability

According to Hossain et al. (2017), designers' ability to make decisions that make the facilities they are designing safe relies on their ability to identify risks early. Considering that most industrial facilities house many components, then one of the first criteria that the proposed solution must meet is the analysis speed of the components of the system. The faster system components are analysed, the sooner designers can make decisions to improve the safety of the facility they are designing. However, components are represented in DMUs in the form of digital objects of various types (e.g., parts, products, sketches), with a nomenclature (e.g., wall, platform, staircase, engine), design parameters (e.g., geometric parameters, materials) and relationships with other digital objects (e.g., distance between digital objects, contact). Therefore, analysis speed depends on how easily digital components can be identified and differentiated and their parameters and relationships with other components can be evaluated. We have thus chosen to break down the analysis speed criterion into three specific criteria:

- The automatic search for and selection of objects in the DMU: This criterion assesses an AMC tool's ability to automatically browse the DMU and differentiate system components by type or the nomenclature associated with them. It also refers to the ability to automatically select all the modeled objects in a given collection (set of all objects in the same part or product of an assembly).
- The ability to automatically access the parameters of digital objects: The rules to be checked can be linked to the parameters of each component to be analysed. An AMC

tool should be able to automatically read the values of the parameters and compare them to those set out in the OHS requirements.

- The automatic verification of relationships between modeled objects: The rules to be verified may involve relationships between various components of the system studied. An AMC tool must be able to quickly compare these relationships to what is indicated in the OHS requirements.

Moreover, organisations need to be able to reuse knowledge from one project to another. Thus, we define a criterion pertaining to an AMC tool's ability to reuse rules from one project to the next. This criterion evaluates whether an AMC tool can easily reuse the OHS rules it extracts as part of one design project in another project or it needs to complete the rule extraction process for each project.

3.5.2 Identification of the AMC tools available in Catia V5

In PLM, knowledge-based engineering (KBE) tools are used to automatically check DMU compliance since they are used to automate repetitive tasks performed by designers (Reddy, Sridhar, & Rangadu, 2015). When it comes to the KBE tools that are available in Catia V5 and their uses, Bodein, Rose, & Caillaud (2009) developed a decision-making process to choose which tool to use according to the desired purpose—product quality verification or repetitive task automation. Their decision tree sheds light on using macro-coded scripts/automation to automate tasks and even combine them with others KBE tools to check the quality of DMUs.

In general, the KBE tools available in Catia V5—DMU Space Analysis, Knowledge Advisor (KWA), Knowledge Expert and macro programming—can be used to record OHS rules and check DMU compliance in a way that serves OHS objectives. The KBE tools available in Catia V5 therefore appear to be AMC tools.

3.5.3 Comparison of tools according to their DMU analysis speed

Once we identified the AMC tools available in Catia V5, we attempted to use them to check DMU compliance with simple declarative rules (e.g., rules relating to the minimum diameter of access hatches and the minimum clearance to be maintained around equipment). These attempts made it possible to identify, based on the above criteria, the following differences between the tools identified:

- DMU Space Analysis can quickly select all the objects in a given collection. This feature makes this tool very effective at checking geometric relationships between objects in the same collection or not. However, DMU Space Analysis does not provide access to an object's parameters (e.g., the type of material it is made of). Moreover, it cannot automatically search for and select objects in DMU using their type or the nomenclature associated with them. As a result, this tool's analysis speed is strongly impacted.
- KWA can create control rules for the parameters associated with the objects to be tested without having to search for the objects. However, a rule must be created for each object and each parameter to be tested in order to use this tool. As a result, this tool appears beneficial for monitoring the quality of digital objects throughout the design process, but the significant amount of effort that is required to create all the rules does not make it useful for design review.
- Knowledge Expert's advantage over KWA is that it can group objects of the same type together to test their common parameters (e.g., the height parameter of extruded objects). This makes it possible to reduce the amount of time required for analysis.
- Macro programming using Visual Basic for Applications (VBA) makes it possible to automatically navigate your way around a mock-up and find objects by name. Once an object has been found, VBA provides methods (functions) to automatically retrieve its parameters. Thus, macro coding can be used to quickly find objects and verify their parameters.

3.5.4 Comparison of tools according to their reusability

As for the reusability of the tools available in Catia V5, DMU Space Analysis, KWA and Knowledge Expert do not support exporting checking rules from one DMU to another. In fact, DMU Space Analysis is somewhat manual, as it requires users to manually select the objects to be checked and define the parameters to be checked each time. KWA and Knowledge Expert can be used to define rules directly related to objects in the DMU. These tools mainly make it possible to monitor the quality of the DMU throughout the modeling process. However, they require that rules be defined for each new project.

VBA, on the other hand, makes it possible to edit interactive macro codes directly in the DMU. As a result, macro codes can be used iteratively throughout the design process or statically for design review by multi-disciplinary teams. Also, codes can be saved in macro libraries or extracted in *.txt* format to be reused with other DMUs. However, this reusability is conditioned by the standardisation of the means of communication between the macro codes and the DMUs, meaning the nomenclature used for digital objects and their design processes (including the nomenclature of parameters of these objects) must be standardised.

Therefore, considering that macro programming is the AMC tool that satisfies both the analysis speed criterion and the reusability criterion, it is the one we chose for our proposed PtD approach.

3.6 Proposed PtD approach

This section constitutes Action 3 of our methodology, which aims to achieve Specific Objective 3—to propose an appropriate PtD approach to use in Catia V5.

In accordance with the results of our analysis of existing design knowledge relating to the use of AMC tools in OHS and of our comparative analysis of the AMC tools available in Catia V5, we propose a PtD approach for risks related to energy sources in the operation stage of industrial facilities designed in Catia V5 that comprises the following four steps: 1) extract

rules related to hazardous energy control from regulatory requirements and classify them according to their automation potential, 2) express the rules in a form that is compatible with the RASE method (declarative form), 3) interpret the rules using the RASE method, and 4) use a macro script to automatically check DMU compliance with the rules interpreted.

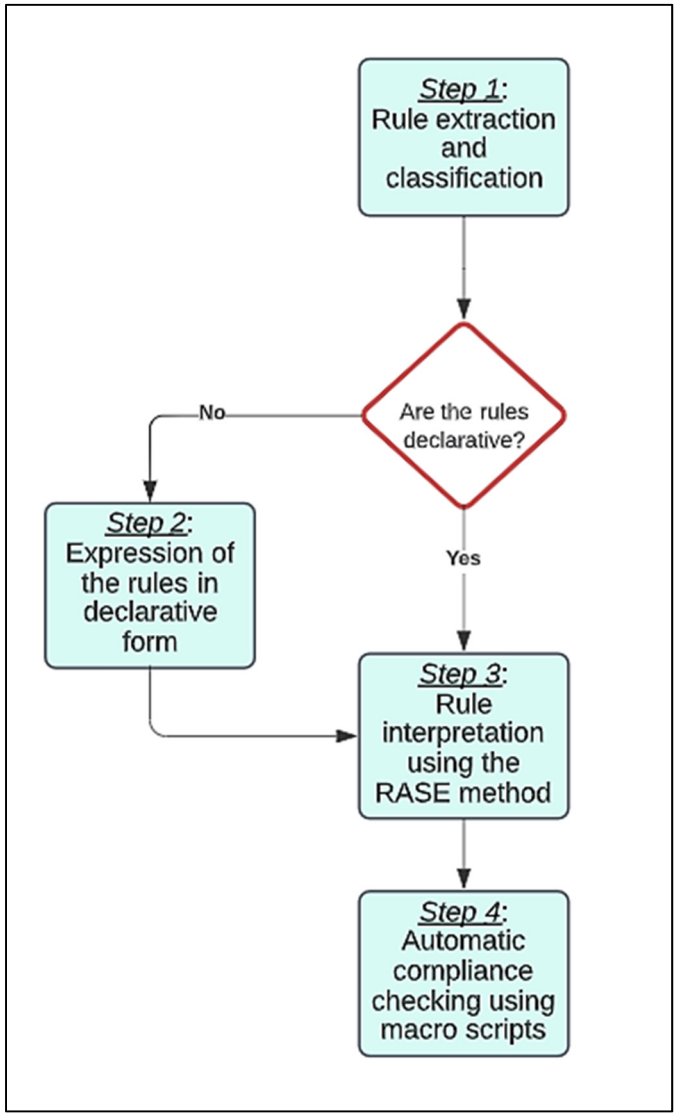

Figure 3.3 Proposed PtD Approach

3.7 Case study

This section constitutes Action 4 of our methodology, which aims to achieve Specific Objective 4—to validate the feasibility of using the proposed PtD approach to prevent risks related to energy sources in the operation of industrial facilities.

We have chosen to validate the proposed PtD approach by using it to check the compliance of a DMU of a hydroelectric facility modelled using Catia V5. The hydroelectric facility is a water spillway comprising three spillway gates that are operated by motorised lifting winches. Workers' health and safety in the operation and maintenance stages of this industrial facility are governed by a MORG that contains rules related to best practices that are of interest to our industrial partner.

3.7.1 Rule extraction and classification according to their automation potential

The MORG contains many rules pertaining to lockout. Table 3.2 below shows the ones we extracted and classified.

Tableau 3.2 Examples of rules related to hazardous energy control extracted from the MORG

Rule statement	Declarative rule	Informative rule
Protection of the electrical equipment must include a circuit breaker for the 600 V supply, circuit breakers protecting each circuit and protection on the motors against overloads and short circuits.	✓	
The lockable elements of the system must be indicated on the DMU.		✓
Hazardous areas (moving parts, pulleys, belts, gears, shafts, etc.) must be provided with guards or protective devices making it impossible to access these hazardous areas during equipment operation.		✓
Any component, system or subsystem requiring intervention must be able to be isolated from its energy sources.		✓
Devices for isolating energy sources must be lockable.		✓

Since energy source identification is the first step in a lockout/tagout program, the rule we chose to focus on in the context of this study is: "*The lockable elements of the system must be indicated on the DMU*." This rule is informative according to Malsane et al.'s classification and therefore cannot be directly automated. We need to know more about the elements, components and subsystems that must be lockable and how the need for an energy source isolation device should be indicated on the DMU before we can automate it.

3.7.2 Expressing the informative rules as declarative rules

In accordance with the format of the rules we want to verify and the system we are studying, we must decompose the system into its energy subsystems and create a catalog of digital labels for marking lockable elements in order to be able to express the above informative rules as declarative rules.

3.7.2.1 System decomposition

In the context of this case study, we first decompose the overall system into its energy subsystems. This makes it possible to identify the elements that must be lockable and the types of energy these elements are likely to expose workers to during the operation stage of the industrial facility. In doing so, we identify which spillway subsystems each type of energy is present in. We also identify the equipment that is powered by each type of energy, the sources of each type of energy, and the devices to be used to isolate the energy sources (Table 3.3). In addition, we determine whether or not the isolation devices are represented in the DMUs (e.g., the term "*reservation made*" in the last column of table 3.3 serves to inform that the detail engineering of the isolation/ lockout device is not done in DMU, there is simply a box symbolising this isolation/ lockout device). Note that the isolation devices must also be lockable.

Tableau 3.3 System decomposition into its energies' subsystems

Type of energy	Subsystem affected	Equipment	Energy source	Isolation/ lockout device	Represented in the DMU?
Potential energy	Spillway gates	Spillway gates	Gravity	Suspension arms	Yes
	Sealing of hydraulic openings	Sealing beams	Gravity	Monorail hook	Yes
Kinetic energy	Spillway gate lifting system	Rotating winch parts	Power supply/ switch	Protective guards	Reservation made
	Sealing beam handling and installation system	Monorail	Monorail power supply/ switch	Monorail power circuit breaker	Reservation made
		Lifting beam	Power supply/ switch	Lifting beam power circuit breaker	Reservation made
Electric energy	Spillway gate heating systems and embedded parts	Spillway gate heating circuit/piping	Heater power circuit breaker	Heating circuit breaker	Reservation made
	Cable shelves	Electrical cables	Electrical panels	Various circuit breakers	Reservation made
Hydraulic energy	Superstructure	Hydraulic passage	Hydraulic current	Cofferdam	Yes
	Superstructure	Hydraulic passage	Hydraulic current	Sealing beams	Yes
	Superstructure	Spillway gates	Hydraulic current	Spillway gates	Yes

3.7.2.2 Catalog of digital labels for marking lockable elements

Since workers are exposed to various types of energy during the operation stage of the industrial facility in question, we propose a catalog of digital labels to be used to identify the

lockable elements, so as to indicate to the designers the types of energy for which isolation/lockout devices must be provided.

de Galvez et al. (2017) proposed in their approach to integrate the identification of hazards in product/process design and represent in the functional diagrams of systems the type of energy linked to each system component by letter(s): “K” for kinetic energy, “E” for electric energy, “Ms” for mechanical energy related to the shape of the part and “Mm” for mechanical energy related to the mass of the part. We took inspiration from this idea and propose in this study to create digital labels that use essentially the same letters to inform designers of what type(s) of energy each part of the system exposes workers to.

Some equipment, such as spillway gates, exposes workers to risks associated with more than one type of energy (Table 3.3), such as electric energy (heating system interventions) and potential energy (suspension of spillway gates during inspections) or hydraulic energy (water retention on one side of the hydraulic passages of the water spillway). This equipment therefore requires a combination of different digital labels to identify the types of energy for which isolation/lockout devices must be provided.

In addition, we consider it necessary that the type of label used inform the designer about the type of element to be locked. More specifically, designers must be alerted to the fact that the element they are modelling in the DMU must accommodate a lockout device (Type B, circular label) or is a component whose lockout/tagout also involves the lockout/tagout of other components and by doing so, requires a lockout/tagout procedure (Type A, rectangular label). The label specifications are shown in Table 3.4 below.

Tableau 3.4 Catalog of digital labels to be used in DMUs during the design process

Type of energy	**Type A label (lockout procedure needed)**	**Type B label (lockout device needed)**
Electric energy		
Potential energy		
Kinetic energy		
Hydraulic energy		

We used Catia V5 User Defined Features (UDFs) to create these digital labels and added all the UDFs created to a new catalog of objects that we called “Catalog of digital labels.” Also, we made sure to incorporate an attachment point when creating the labels so they can be attached to a specific point on lockable elements in the DMU.

Figure 3.4 Example of label creation

Once we have created the catalog of digital labels to be used to identify lockable elements in DMUs, we can reformulate the previously mentioned informative rule as follows: "*Digital labels indicating the type(s) of energy present must be attached to components that pose a risk of releasing energy.*" More specifically, in the case of spillway gates, for example, considering that interventions on spillway gates in the operation stage pose risks related to the sudden release of potential energy (spillway gates must be adequately suspended), electric energy (spillway gate heating circuits and lifting mechanisms are powered by electricity) and hydraulic energy (some work on spillway gates requires the hydraulic passage to be isolated using sealing beams), the rule for spillway gates must be rewritten as follows: "*When maintenance work is planned on or around a spillway gate, the gate must be marked with a Type A digital label indicating the presence of electrical, hydraulic and potential energy.*" An example for Type B labels would be electrical panels that contain circuit breakers, which are the type of isolation device used for most equipment, in which case the rule must be rewritten as follows: "*Electrical panels must be marked with Type B labels when they contain circuit breakers to isolate circuits for maintenance.*"

3.7.3 Rule interpretation using the RASE method

In the case of spillway gates, we can deduce:

- **Requirement:** Virtual labels for hydraulic, electric and potential energy.
- **Applicability:** All spillway gates that will undergo maintenance.
- **Selection:** Type A label.
- **Exception:** No exception is provided for in this rule.

In the case of electrical panels, we can deduce:

- **Requirement:** Virtual labels for electric energy.
- **Applicability:** Electrical panels supplying circuits on which maintenance activities are planned.
- **Selection:** Type B label.

- **Exception:** No exception is provided for in this rule.

3.7.4 Automatic compliance checking using macro scripts

In this case study, automatic DMU compliance checking is essentially a matter of verifying there exists a contact-type relationship between the lockable spillway components and the digital labels created. Spillway components that must be lockable and are not yet marked on the DMU are automatically colored red to alert designers they have not yet been marked.

We thus first mark lockable spillway components using the digital label(s) indicating the type of energy present, as shown in Figure 3.5 below.

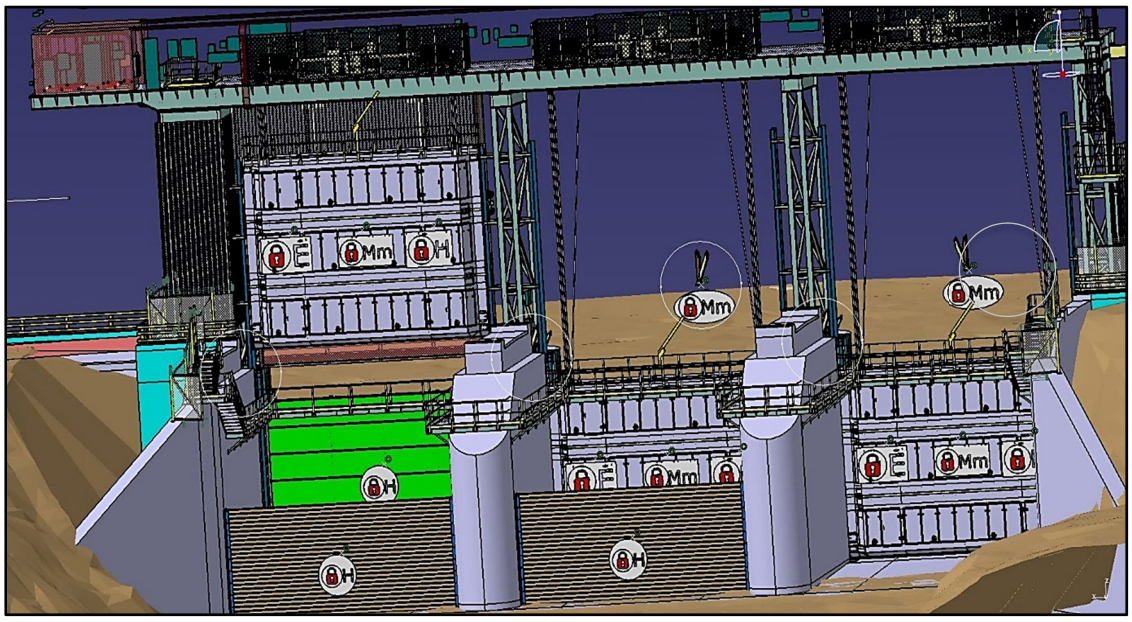

Figure 3.5 Marking of lockable spillway components using the digital labels

Once the lockable spillway components have been marked, we run the macro script to check that all spillway components that require a lockout device or procedure have been marked. We deliberately left the electrical panels unmarked in Figure 3.5 to test the macro script and ensure they are identified as non-compliant during the compliance checking process. Following the automatic compliance checking process, we obtain Figure 3.6 below in which the unmarked lockable spillway components are identified in red.

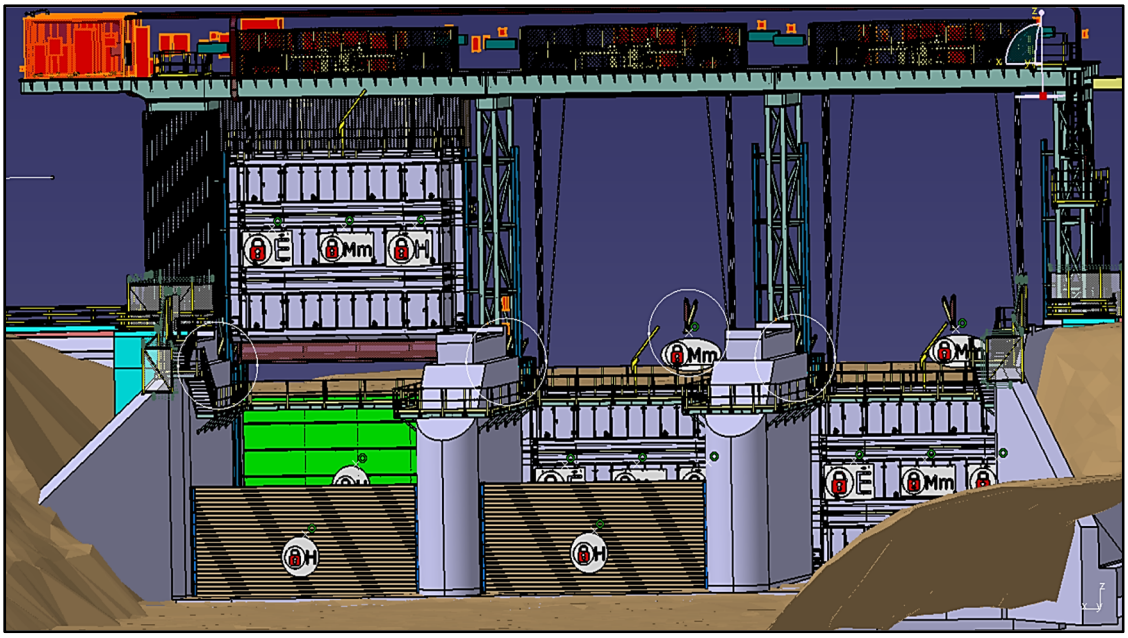

Figure 3.6 Automatic identification of the lockable components (electrical and control panels) that are missing a digital label

3.7.5 Implications

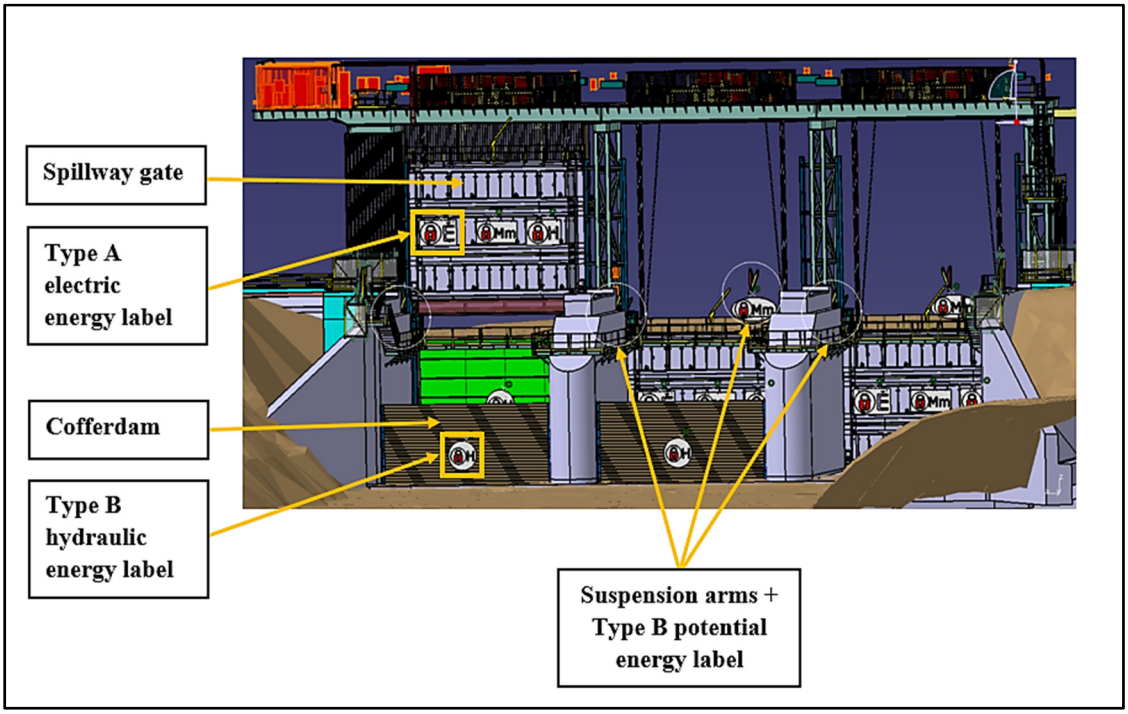

Figure 3.7 Identification and interpretation of digital labels in the DMU

In the case of the water spillway studied in the context of this case study, the marking of the spillway gates with Type A digital labels indicating the presence of potential energy informs designers they need to consider whether suspension arms (isolating devices) are provided and whether they are sufficient to provide a procedure for containing the potential energy of the spillway gates. The suspension arms must then be marked with Type B potential energy labels indicating to the designers that the suspension arms can move once they have been properly positioned and lockout devices should therefore be provided for them. However, if the designers consider that gravity alone is sufficient to maintain the suspension arms in the desired position once they have been properly positioned, they may decide not to provide an additional lockout device. Similarly, the Type A digital hydraulic energy label marked on the spillway gates informs the designers that it is necessary to provide a means of locking out the water on both sides of the hydraulic passage to perform some maintenance on the spillway gates. However, since lockout is done using cofferdams and sealing beams in this case, we affix Type B hydraulic energy labels to these elements to let the designers know they can reconsider whether these elements can be moved when they are in use. In this case, it would be necessary to provide appropriate lockout devices for the cofferdams and sealing beams.

Our proposed PtD approach makes it possible, through the identification of lockable system components, to support designers when making design decisions so that the various types of energy that are present in the system can be effectively controlled during the design stage. However, the extracted rules, particularly requirements to provide energy source isolation devices, ensure those devices are lockable, etc., must be considered as a whole when making these decisions.

It is thus a question of using the proposed PtD approach particularly to analyse the system components that need lockout/tagout procedures. Our proposed PtD approach is able to check the marking and position of isolation devices in the DMU. It can therefore be used to check the relationships between the isolation devices modeled in the DMU to test the lockability of the system components that need lockout/tagout procedures.

3.8 Discussion

A variety of PtD approaches for risks related to energy sources in systems are identified in the Background Knowledge section of this study. Some of the works mentioned integrated the geometric aspect of this type of risk by identifying the critical points in factory CAD drawings, while others integrated the temporal aspect by analysing the appearance of failures in the operation of machines or examining functional diagrams of equipment. However, none of them proposed to integrate the visualisation of critical elements in DMUs in such a way as support designers when making decisions about the control measures to be adopted and alert them to missing critical elements.

Moreover, most existing PtD approaches for risks related to hazardous energy sources in systems use theoretical mathematical models to simulate, predict, and control the behavior of the systems analysed. They do not allow designers to rely on the useful information DMUs can provide to support risk analysis and communication. Thus, our proposed PtD approach is an extension of other approaches that tend to take advantage of new digital technologies to improve OHS outcomes. It provides a basis for automatically using the information provided in DMUs to prevent risks related to energy sources. It could therefore be used to improve the efficiency and speed of execution of existing PtD approaches by offering advantages related to visualisation of critical elements in DMUs and the possibility of automatically using the data provided by DMUs. To this end, it would be wise to analyse in future work the possibility of coupling our proposed PtD approach with methods that integrate the dynamic nature of the system in question.

As for the validity of our proposed PtD approach, we validated its functionality using a case study. This effectively highlighted the proposed PtD approach can be used to verify the compliance of the DMU of our industrial partner’s hydroelectric facility with the prevention rules pertaining to best practices that we extracted from our partner’s MORG. However, the results cannot be generalized for use in other cases or industrial facilities solely on the basis of these results. Further studies applying the proposed PtD approach to multiple projects belonging to different industrial companies are needed to be able to generalise these results for

the entire field of OHS. The use of a single case study does, however, make it possible to find a starting point, a technology-based solution, that can be gradually improved upon as the scope of study is extended.

However, the case study appears to be a so-called test method, which has made it possible to identify the limits of the proposed approach. It has effectively shown it is possible to combine the RASE method and macro programming in Catia V5 to automatically check DMU compliance with rules pertaining to hazardous energy control in systems. The need to break down the system into energy subsystems and create a catalog of digital labels are some examples of the difficulties that can be encountered when transforming informative rules into declarative rules and are due to how the rules are formulated. Other difficulties related to the nomenclature used to create and save the digital objects shown in the DMUs can be encountered during the verification step. Therefore, how DMUs are prepared and rules are formulated greatly influences our proposed PtD approach's ability to effectively perform automatic DMU compliance checking. To this end, it would be interesting to develop content standards for DMU preparation in terms of the elements that are useful for preventing risks related to energy sources in the operation stage and the nomenclature used for these elements. Furthermore, the main limitation of this study is linked to the fact that PtD approach proposed is suitable only for facilities designed using CatiaV5. However, the interoperability of CAD software and the existence of other AMC tools are assets for generalising the proposed approach for facilities designed using other CAD software programs.

3.9 Conclusion

The purpose of this study was to propose an approach for preventing risks related to energy sources in the operation and maintenance stages of industrial facilities during the design stage by using AMC tools. Our study focused on DMUs prepared using the CAD software program Catia V5. To achieve our objective, we first conducted a comparative literature review on using automatic model checking (AMC) tools for preventing OHS risks in the construction and manufacturing industries during the design stage. Afterwards, we conducted a comparative

analysis of the AMC tools that are available in Catia V5 and can be used for automatic design compliance checking.

We then proposed a PtD approach comprising four steps: 1) extract rules related to hazardous energy control from regulatory requirements and classify them according to their automation potential, 2) express the rules in a form that is compatible with the RASE method (declarative form), 3) interpret the rules using the RASE method, and 4) use a macro script to automatically check digital mock-up (DMU) compliance with the rules interpreted. Our proposed PtD approach is beneficial in that it makes it possible to visualise elements in DMUs to alert the designers to missing critical elements and to reduce the amount of time required for analysis by automating some steps and in turn improving efficiency by reducing the likelihood of errors. Moreover, our proposed PtD approach makes it possible to visualise non-conformities in DMUs, which helps designers analyse their designs' impact on the OHS of workers as recommended by Standard CSA Z460:20, which is the standard that applies to controlling risks related to energy sources in Canada.

This study's limitations are related to the need to develop content standards for DMU preparation in terms of the elements that are useful for preventing risks related to energy sources in the operation stage and the nomenclature used for these elements. Moreover, the proposed PtD approach is applicable only to DMUs prepared using Catia V5. However, it can be exploited for facilities designed using other CAD software programs. Since the RASE method is general, it will simply be a question of identifying the AMC tools available in other CAD software programs or taking advantage of the interoperability that exists between some CAD software programs.

In future work, we plan to study the possibility of coupling our proposed PtD approach using macro programming with other methods that integrate a system's dynamic nature in the operation stage to assess the level of risk corresponding to the energy sources identified and promote the visualisation of risks in DMUs. In addition, it would be necessary to carry out an evaluative study of the proposed PtD approach by using it in multiple case studies involving different industrial partners.

CHAPITRE 4

DISCUSSIONS, RECOMMANDATIONS ET PISTES DE DÉVELOPPEMENTS FUTURS

L'objectif de ce chapitre est de discuter de la validité du protocole de recherche, de la validité des résultats de l'étude et des forces et faiblesses de l'approche proposée. Ce chapitre présente par ailleurs les recommandations et les pistes de développements futurs de ces travaux de recherche.

4.1 Limites de la méthodologie

4.1.1 Les biais relatifs au choix de la recherche en conception

La méthodologie de recherche que nous avons adoptée est une recherche en conception, menée avec un partenaire industriel précis, dont les procédures de travail lui sont propres. Cette méthodologie de recherche en conception nous a permis de mener un processus itératif en cinq phases : 1) l'étude comparative des approches de gestion des risques de SST à l'aide des maquettes numériques BIM et PLM, 2) l'étude comparative des approches qui intègrent les méthodes formelles et structurées d'identification des risques aux maquettes numériques, 3) l'étude comparative des outils de vérification automatique des modèles disponibles sous Catia V5, 4) la proposition d'une approche d'utilisation des maquettes numérique pour la prévention par la conception des risques de SST, 5) la validation de l'utilisabilité de cette démarche par une étude de cas portant sur l'identification des risques liés aux sources d'énergie sur la maquette d'un évacuateur de crues.

Dès lors, la redéfinition progressive du problème au cours du processus de recherche en conception peut être biaisée par les pratiques de l'entreprise. De manière plus spécifique, dans le cadre du présent projet de recherche, le passage de la phase 2 (l'étude comparative des approches qui intègrent les méthodes formelles et structurées d'identification des risques aux maquettes numériques) à la phase 3 (l'étude comparative des outils de vérification automatique des modèles disponibles sous Catia V5) a été fortement impactée par les pratiques propres à

l'entreprise partenaire. En effet, la modélisation des ouvrages industriels du partenaire se fait essentiellement à l'aide du logiciel de CAO Catia V5.

Cependant, de telles pratiques sont dynamiques au sein d'une entreprise et varient également d'une entreprise à une autre. Ainsi, la méthodologie proposée devra être mise à jour ou réadaptée lorsque les pratiques viendront à changer dans l'entreprise ou lorsqu'on s'intéressera à un ouvrage industriel dont la maquette est préparée à l'aide d'un autre outil de CAO.

Ainsi, les pratiques de l'industrie influent essentiellement ici sur l'outil de vérification des maquettes à utiliser. Notre étude a permis de valider la faisabilité de la prévention à la source des risques de la phase d'exploitation des ouvrages industriels. De ce fait, la variation de l'outil de vérification des maquettes n'a aucun impact sur la faisabilité de la prévention par la conception de ces risques de la phase d'exploitation des ouvrages. La faisabilité de la vérification automatique repose essentiellement sur la manière dont la maquette a été préparée (les informations qu'elle contient) et la capacité à traduire les règles en langage compréhensible par la machine.

4.1.2 Les biais relatifs à l'analyse de contenu

Les biais potentiels liés à l'analyse de contenu sont relatifs au nombre de documents analysés (taille de l'échantillon) et à la nature des documents analysés.

Concernant le nombre de documents, Leedy & Ormrod (2015) soutiennent qu'une analyse de contenu menée sur un petit échantillon de documents peut mener à des résultats fiables. Pour ce faire, dans le cas où l'on s'intéresse à des échantillons de petite taille (un faible nombre de documents), il est important de procéder à une analyse systématique de tous les documents dans leurs entièretés en utilisant des critères prédéfinis (Leedy & Ormrod, 2015). Telle est la démarche que nous avons suivie, notamment pour l'analyse des documents présentés sur la figure 4.1 - *Relevant literature on approaches to using AMC tools in BIM and PLM for OHS purposes*-.

Concernant la nature des documents (articles scientifiques), la fiabilité est assurée, d'une part, par la fiabilité des bases de données que nous avons consultées, et, d'autre part, les documents que nous avons retenus pour une analyse approfondie sont essentiellement ceux dont les auteurs avaient pu valider leurs approches par des études de cas.

Cependant, ayant par ailleurs interprété les GEME du partenaire industriel en vue d'en extraire les règles de SST, il est important de relever que cette interprétation des GEME a pu induire des biais liés notamment à notre compréhension de la sémantique des textes et à notre propre culture sécurité.

4.2 Validité des résultats de l'étude

Le but de notre étude était de proposer une démarche d'utilisation des maquettes numériques pour la prévention à la source des risques de SST des travaux d'exploitation des ouvrages industriels. La démarche proposée a été mise en œuvre uniquement pour le cas de l'exploitation d'un évacuateur de crues modélisé sous Catia V5. Il est question dans cette section d'évaluer la possibilité d'utiliser la démarche proposée dans le cadre de cette étude pour la prévention des risques de SST d'autres ouvrages industriels.

Le passage d'un ouvrage industriel à un autre implique un changement potentiel du logiciel de CAO utilisé en conception. La démarche proposée dans le cadre de l'étude utilise les outils de vérification automatique de maquettes disponibles sous le logiciel de CAO Catia V5. Elle utilise comme prérequis la capacité d'extraction des règles de maintenabilité et d'exploitabilité des ouvrages des documents normatifs/règlementaires. Cette extraction repose essentiellement sur la méthode RASE qui est indépendante du règlement utilisé et des logiciels de CAO utilisés.

Dès lors, la capacité à exploiter les résultats de cette étude dans des contextes différents repose essentiellement sur la capacité à disposer d'outils de vérification automatique des maquettes compatibles avec le logiciel de CAO utilisé pour la préparation de la maquette.

Dans l'univers BIM, des outils de vérification automatique de modèles ont été développés de manière à être indépendants des logiciels de CAO utilisés pour la préparation de la maquette. Ces outils sont compatibles avec les fichiers sous format IFC. C'est par exemple le cas de Solibri Model Checker. La seule exigence qui limiterait l'utilisation de ces outils de vérification automatique est la préparation de la maquette de manière à ce qu'elle contienne les informations utiles aux analyses que l'on souhaite effectuer (Kincelova, 2019).

Dans l'univers PLM, les outils de Knowledge-Based Engineering (KBE) tels que ceux identifiés dans notre étude de cas ne sont pas l'apanage de l'outil de modélisation Catia V5. En effet, les usages des outils de KBE sont variés et permettent de créer dans divers outils de modélisation PLM des modules de gestion des connaissances (Catic & Malmqvist, 2007). Cependant, ces modules de gestion des connaissances n'ont pas été développés avec l'intention initiale de servir à la vérification automatique des modèles. Ils présentent des usages variés, notamment la modélisation paramétrique (Catic & Malmqvist, 2007). Dès lors, la mise en œuvre de la méthodologie proposée à un environnement de modélisation PLM autre que Catia V5 exige de la part des concepteurs d'identifier préalablement les utilisations possibles des modules de gestion des connaissances disponibles sur cet environnement de modélisation.

Par ailleurs, l'interopérabilité est une question essentielle aussi bien dans les univers BIM que PLM. Des logiciels de CAO qui ne proposent pas des modules de vérification automatique des maquettes peuvent être interopérables avec d'autres logiciels de CAO qui en proposent. Dans ce cas, l'interopérabilité serait un facteur de généralisation de la démarche proposée.

4.3 Forces et faiblesses de la démarche proposée

4.3.1 Description d'un système : "What Is + What If"

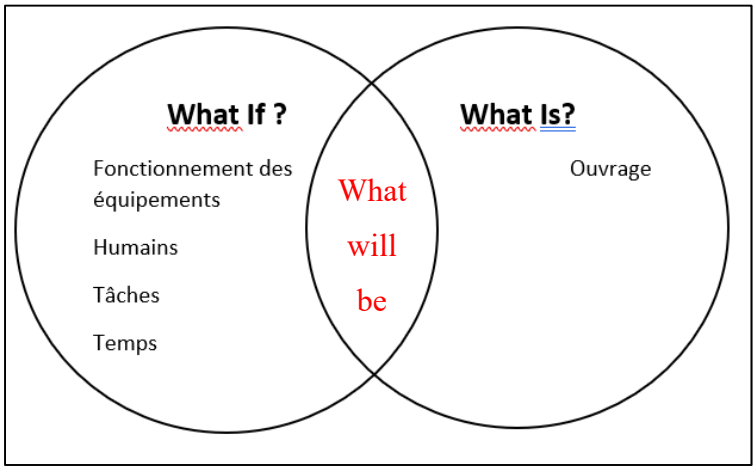

Figure 4.2 Modèle d'un système
Inspiré de Dakwat & Villani (2018)

Dans une logique d'analyse d'un système afin d'en identifier les risques de manière anticipative, la description et l'analyse du système devraient permettre d'identifier d'une part les risques sur le système liés aux caractéristiques intrinsèques des divers composantes de ce système et d'autre part les risques qui naissent ou qui sont renforcés du fait des interactions entre les éléments de ce système.

Les caractéristiques intrinsèques du système correspondent à ce que nous entendons ici par « What Is ». En effet, l'ouvrage étudié est caractérisé par les spécifications techniques de ses composantes. Cet état actuel et statique du système que nous étudions ne tient pas compte de son évolution dans le temps et des déviations potentielles qui pourront être observées au cours du cycle de vie de l'ouvrage (dysfonctionnement d'un équipement, erreur humaine, etc.).

Le « What If » tel que nous l'entendons ici se rapporte aux modifications du fonctionnement du système dans son ensemble à la suite d'une possible déviation d'un élément du système de son fonctionnement initial. Il inclut également la progression du système au cours de son cycle

de vie (les défaillances des pièces par exemple). Ainsi, dans le « What If » nous intégrons aussi bien les risques qui peuvent découler du dysfonctionnement d'une composante de l'ouvrage que les risques qui peuvent naitre ou être renforcés du fait de l'interaction entre l'ouvrage et l'humain qui effectuera les travaux d'exploitation et de maintenance.

4.3.2 Forces de l'étude : Analyse du What Is

La démarche d'identification automatique des risques proposée se basant essentiellement sur les listes de vérification, elle présente l'avantage de permettre d'analyser l'état initial et statique du système en traitant les risques qui sont règlementés. Elle sert ainsi de base fondamentale pour la réalisation d'analyses de risques poussées pour des situations d'accidents prévues dans les règlements.

Par ailleurs, assurer la conformité des modèles aux règlements c'est éliminer des facteurs de risques qui, par le passé, ont conduit ou non à des accidents, mais qui ont cependant conduits à la prise de mesures correctives. Ces facteurs de risques peuvent relever des divers aspects du travail.

4.3.3 Limites de l'étude : Analyse du What If

Les règles de SST correspondent à des mesures prises pour contrôler des facteurs de risques qui ont déjà été préalablement identifiés. Toutefois, d'autres risques peuvent exister à l'état latent dans le système sans pouvoir être identifiés au moyen de ces règles. Par ailleurs, les règles ne reflètent pas toujours le niveau de connaissances sur les risques et les facteurs de risques auxquels un produit, un équipement ou un ouvrage peut exposer les travailleurs. En effet, l'évolution de la science étant continue, les entreprises ne suivent pas toujours le même rythme dans la mise à jour de leurs règlements et normes en matière de SST. Ainsi, on peut très souvent avoir des règles avec consensus scientifiques qui ne sont pas encore intégrées aux règlements.

Dès lors, la gestion des risques à l'aide des règles de SST présente comme inconvénient de ne pas inclure dans les analyses deux grands groupes de risques : les risques avec consensus scientifiques et les risques non règlementés.

Aussi, la revue de littérature nous a permis de regrouper les aspects du travail en quatre grandes catégories : organisationnels, environnementaux, humains et technologiques. La prévention par la conception est en soi est une analyse des potentiels effets des choix de conception sur la santé et la sécurité des travailleurs. La démarche de prévention proposée peut permettre d'éliminer essentiellement les risques découlant des aspects organisationnels du travail (répartition spatiale des activités), environnementaux (circulation d'air dans les espaces clos) et technologiques (respect de la prévision des dispositifs de protection limitant les accès aux pièces en mouvement des machines par exemple). Les aspects humains du travail ne sont pas intégrés dans cette approche. Par exemple, on n'étudie pas l'effet des choix de conception sur les sollicitations gestuelles et posturales des travailleurs (aspect humain) ou l'effet combiné du choix de conception et d'une erreur humaine hypothétique. Par ailleurs les risques accidentels de dysfonctionnement des équipements (autres aspects technologiques du travail), non prévus dans les règlements de SST ne sont non plus intégrés dans cette approche.

4.4 Recommandations et pistes de développements futurs

4.4.1 Responsabilité des concepteurs

Les méthodes de vérification automatique discutées plus haut sont variées et les outils présentés, particulièrement ceux disponibles sur Catia V5 tels que les macros, peuvent être utilisés pour modifier automatiquement les objets sur la maquette numérique lorsque ceux-ci ne sont pas conformes aux règlements. Par exemple, l'outil Checks de Knowledge Advisor peut être lié à l'éditeur de règles de ce même module de façon à indiquer au logiciel des réactions correspondant à chaque non-conformité constatée (ces réactions sont pour ainsi dire des modifications à faire sur la maquette numérique de façon automatique).

Cependant, nous recommandons que l'automatisation de la vérification de la conformité des maquettes conçues vis-à-vis des règles de sécurité se limite essentiellement à la vérification. Les modifications subséquentes devraient être validées par l'ingénieur qui en assume la responsabilité tel que prescrit par l'Ordre des Ingénieurs du Québec.

4.4.2 Prise en compte de l'aspect humain du travail

Les outils de modélisation tels que Catia V5 présentent des modules d'analyse ergonomique qui permettent d'intégrer le génie des facteurs humains/ergonomie à la conception des produits. Ces outils peuvent servir à lever les limites de l'approche préconisée du fait de la non prise en compte des aspects humains du travail. Ainsi, il serait judicieux de procéder dans un premier temps à une analyse ergonomique des travaux de maintenance et d'exploitation des ouvrages industriels avant de procéder, dans un second temps, à la vérification automatique de la conformité de la maquette. En effet, en utilisant les mannequins virtuels pour résoudre des problèmes d'atteinte des équipements et de leur visibilité, par exemple, le concepteur peut être amené à modifier l'agencement spatial de ses équipements ou à mettre en place des équipements nouveaux qui doivent eux aussi passer la vérification de conformité. C'est cette raison qui justifie notre proposition de réaliser les analyses ergonomiques avant la vérification automatique de conformité aux règles de SST.

Par ailleurs, de manière à réaliser des analyses ergonomiques plus complètes sous Catia V5, il serait important de procéder à une collecte de données et des analyses terrain avec les exploitants de façon à capter tous les enjeux auxquels ils font ou pourraient faire face au quotidien. Une telle analyse de terrain permettrait de décrire plus précisément le système de travail, les situations de travail, de même que d'identifier les tâches et les scénarios critiques qui seraient par la suite simulés et analysés sous Catia V5.

4.4.3 Intégration des méthodes émergentes d'identification des risques

Au cours de l'exploration des démarches d'identification automatique des risques de SST dans la littérature, nous avons mis en évidence que cette identification est possible en mettant en

commun trois éléments essentiels : les maquettes numériques, la modélisation de la connaissance et les outils d'identification des risques de SST.

Du point de vue du critère de la flexibilité dans la représentation de la connaissance, les approches qui utilisent les ontologies telles que l'intégration des arbres de causes aux maquettes numériques sont plus flexibles que les outils de vérification automatique de conformité. En effet, les outils de vérification automatique de conformité permettent d'identifier uniquement les risques qui sont liés aux attributs des objets BIM. Cependant, par la représentation des concepts, les ontologies permettent de lier les risques à divers facteurs tels que les facteurs environnementaux, les équipements utilisés par les travailleurs, les tâches à effectuer ou les attributs des objets BIM.

Cependant, le couplage de ces ontologies avec les méthodes de décomposition que sont les méthodes HAZOP et les arbres de causes a conduit à une complexification des critères de succès en impliquant l'optimisation du choix des objets numériques à analyser et celui des tâches ou des évènements ou des modes de défaillances à analyser. La littérature scientifique propose des méthodes émergentes d'identification des risques qui sont des méthodes systémiques. Ces méthodes émergentes sont les méthodes FRAM ou STAMP-STPA qui permettent de lever les limites liées à l'utilisation des méthodes de décomposition pour l'analyse des systèmes complexes.

Il apparait dès lors la possibilité d'étudier la faisabilité du couplage des maquettes numériques avec ces méthodes émergentes dans le but d'identifier, d'une part, les risques non règlementés et les risques avec consensus scientifique et, d'autre part, les risques liés aux effets de renforcement entre les risques.

CONCLUSION

Notre étude avait pour objectif de proposer une démarche d'utilisation des maquettes numériques pour la prévention à la source des risques liés aux travaux d'exploitation et de maintenance des ouvrages industriels. Nous avons adopté une méthodologie de recherche en conception. Celle-ci nous a permis de mener un processus itératif en cinq phases : 1) l'étude comparative des approches de gestion des risques de SST à l'aide des maquettes numériques BIM et PLM, 2) l'étude comparative des approches qui intègrent les méthodes formelles et structurées d'identification des risques aux maquettes numériques, 3) l'étude comparative des outils de vérification automatique des modèles disponibles sous Catia V5, 4) la proposition d'une approche d'utilisation des maquettes numériques pour la prévention par la conception des risques de SST, 5) la validation de l'utilisabilité de cette démarche par une étude de cas portant sur l'identification des risques liés aux sources d'énergie sur la maquette d'un évacuateur de crues.

De la phase 1, il a émergé la nécessité de coupler les approches de prévention des risques de sécurité de travail et les approches de prévention des risques ergonomiques pour que les mesures de prévention soient plus complètes. De la phase 2, il a émergé le besoin d'effectuer une triangulation entre plusieurs méthodes d'identification des risques et de les intégrer aux maquettes numériques afin que les points forts des unes puissent combler les points faibles des autres. Cependant, la nécessité de traiter les risques règlementés avant les risques non règlementés nous a amené à nous concentrer autour de l'intégration des listes de vérification aux maquettes numériques. A cet effet, nous avons formulé quatre objectifs spécifiques de notre étude : 1) identifier les étapes permettant l'utilisation effective des outils de vérification automatique des maquettes pour la prévention des risques de SST; 2) identifier et comparer les outils disponibles sur Catia V5 qui peuvent servir à la vérification automatique des maquettes; 3) proposer une démarche d'utilisation de l'outil optimal identifié, pour la prévention à la source des risques de la phase d'opération des ouvrages industriels et 4) valider la faisabilité de la démarche proposée pour la prévention des risques liés aux sources d'énergie, risques prioritaires du partenaire industriel de notre projet.

Dès lors, dans la phase 3, l'étude comparative des outils des vérification automatique des modèles s'est concentrée autour de ceux disponibles sous Catia V5 et a permis de valider le potentiel d'utilisation des codes macros pour vérifier automatiquement que les ouvrages conçus sont conformes aux règlements de SST. Nous avons donc proposé une approche de prévention qui consiste à : 1) extraire les règles de SST des codes/règlements et meilleures pratiques en vigueur, 2) reformuler les règles de manière à les rendre compatibles à la méthode RASE, 3) interpréter les règles à l'aide de la méthode RASE et, 4) utiliser les codes macros pour enregistrer les règles de SST et vérifier automatiquement la conformité des maquettes des ouvrages aux règles de SST. Les codes macros permettront ainsi de vérifier la présence d'objets utiles à la SST sur la maquette, ainsi que la conformité de leurs propriétés/attributs aux règlements de SST. Ce faisant, cette approche ainsi proposée permettrait d': 1) identifier sur la maquette numérique les risques règlementés de sécurité du travail et 2) alerter les concepteurs des ouvrages industriels de non-conformités par rapport aux règlements de SST, de manière à les soutenir dans la prise de décisions quant aux impacts de leurs conceptions sur la SST des travailleurs de la phase d'exploitation et de maintenance des ouvrages.

Enfin, nous avons recommandé de développer cette approche en la couplant à la prévention des risques ergonomiques à l'aide de l'utilisation du module d'analyse ergonomique de Catia V5. Par ailleurs, il serait judicieux d'étudier la possibilité d'intégrer les méthodes émergentes d'identification des risques que sont FRAM et STAMP/STPA aux maquettes numériques de façon à identifier les risques non règlementés, prendre en compte les interactions entre les risques et analyser les maquettes numériques des ouvrages de manière systémique.

ANNEXE I

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU PROJET

Tableau - A I -1 Listes des productions scientifiques associées au projet

Référence	**Observation**
2022 Tiaya, C., Nadeau, S., Boton, C., Rivest, L. Digital Mock-Ups as Support Tools for the Prevention Through Design of Risks Related to Energy Sources in the Operation of Industrial Facilities	Article de revue avec comité de pairs, soumis pour publication à *Results in Engineering*.
2021 Tiaya, C., Nadeau, S., Boton, C., Rivest, L. BIM and PLM-Based Management of Occupational Health and Safety: A Comparative Literature Review. CIB W78 2021 (CIB W78 – Information Technology for Construction 2021), Proceedings of the 38th International Conference of CIB W78, Luxembourg, 13-15 October, pp 892-901 (ISSN: 2706-6568), http://itc.scix.net/paper/w78-2021-paper-089.	Article de conférence avec comité de pairs, publié et disponible en ligne.
2022 Tiaya Tedonchio, C., Nadeau, S., Boton, C., Rivest, L. Évaluation du rôle des maquettes numériques dans l'identification des risques de santé et de sécurité des opérations d'entretien et de maintenance industriels. Rapport de recherche confidentiel, École de technologie supérieure (Secteur de l'énergie), 187 pages.	Rapport de recherche confidentiel complété.
2022 Tiaya, C. CDE – PLM en association avec Hydro-Québec. Colloque du GRIDD, École de technologie supérieure.	Activité de vulgarisation.

ANNEXE II

CONFERENCE PAPER: BIM AND PLM-BASED MANAGEMENT OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY: A COMPARATIVE LITERATURE REVIEW

Christian Tiaya Tedonchio[a], Sylvie Nadeau[b], Conrad Boton[c], Louis Rivest[d]

[a, b] Département de Génie mécanique, [c] Département de Génie de la construction,
[d] Département de Génie des systèmes, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame West, Montreal, Quebec, Canada, H3C 1K3

Article publié dans le cadre de la conférence CIB W78 2021*, Octobre 2021*

Abstract

Workers in the construction industry remain particularly exposed to occupational health and safety (OHS) risks despite recent attempts to use BIM mock-ups to manage OHS. However, workers in the manufacturing industry are less exposed due to the efficient use of PLM mock-ups, among other factors. In this paper, we investigate the works published in the last decade addressing the use of BIM and PLM mock-ups in OHS risk prevention. Then, we compare these two kinds of mock-ups and identify the digitalized information that is integrated into risk management. It emerges that BIM-based OHS risk management mainly integrates information about site configuration and task scheduling, while PLM-based OHS risk management mainly integrates information about task sequences and interactions between humans, products, and tools/equipment. Furthermore, BIM-based approaches are used mainly for managing occupational safety risks, while PLM-based approaches are used mainly for managing human factors/ergonomics (HF/E) risks. To avoid siloed approaches to manage OHS and provide more sustainable and systemic OHS risk mitigation measures, it is more suitable to merge the BIM and PLM approaches. Such an approach would be particularly suitable for integrated risk management of industrial buildings which are at the crossroads of BIM and PLM studies.

Keywords: BIM, PLM, digital mock-up, occupational safety, human factors, ergonomics, risk, prevention, information, interaction, integrated risk management, industrial building

1. Introduction

Digital transformation makes it possible for various industries to improve their performance and efficiency (Junior, Macada, Brinkhues, & Montesdioca, 2016 ; Nadeau & Landau, 2018). In the construction industry, the advent of BIM has made it possible to improve stakeholder performance on projects and thereby reduce construction costs and delays and improve the quality of built facilities (Fytrou-Moschopoulou, 2016). However, despite these positive impacts of BIM mock-ups, the construction industry remains far from being risk-free for site workers. In Quebec, statistics from the Standards, Equity, and Occupational Health and Safety Commission (CNESST) for the year 2019 rank the construction industry first among hazardous industries with 63 deaths, or about three times the number of deaths observed in the processing industry, which ranks second (CNESST, 2020).

This unsafe characteristic of the construction industry is due in part to the great variety of occupational health and safety (OHS) risks that workers are exposed to. In light of the great variety of risks, we are focusing on three main risk categories in this study: industrial hygiene risks, occupational safety risks, and human factors/ergonomics (HF/E) risks. Industrial hygiene risks relate to physical, biological, and chemical risks associated with the working environment, like the spread of dust or contaminants in the air (IST, 2007). The occupational safety risks category focuses on professional injury risks, known as acute risks, such as falls, and mechanical risks, such as collisions with construction machinery (IST, 2007). HF/E risks are those that arise from heavy physical and mental workloads, like from uncomfortable and unsafe working postures imposed on workers. The management of HF/E risks must integrate a wide range of human parameters in the process analysis. Some examples of these parameters include the needs, skills, capacities, and resilience of workers (Peruzzini, Carassai, & Pellicciari, 2017). In the manufacturing industry, those parameters can be integrated in

workplace HF/E assessments by introducing a virtual mannequin or digital human modeling (DHM) in virtual scenes (Joung et al., 2015).

The reasons generally given to explain the lack of performance of the construction industry, compared to other manufacturing industries such as aeronautics or the automobile, are related to the structural differences existing between them. Indeed, fundamental differences exist between construction processes and operations including the fact that in manufacturing, operations take place in fixed, stable and controlled environments. In construction, the products are static, with repetitive operations in environments exposed to hazards and potentially different for each operation. Thus, overhead for digital mock-up (DMU) is more important and the modeling of construction processes and operations is more costly in terms of time and resources. However, since various provincial and national occupational health and safety statutes, like Quebec's *Act respecting occupational health and safety,* recommend risk prevention at the source, there is much literature proposing the use of digital mock-ups for early hazard identification in the construction industry (Fargnoli & Lombardi, 2020 ; Martínez-Aires et al., 2018) and other sectors including the manufacturing industry. In the aeronautical and automotive industries, for example, PLM mock-ups are used very early in the design phase for HF/E design and analysis of workplaces and processes to improve worker's health and safety (Joung et al., 2015).

Despite the similarities between BIM and PLM approaches, there is virtually no research work dedicated to the comparison between the use of BIM-type and PLM-type mock-ups for occupational health and safety management. However, such a comparison is important to improve BIM practices through a good understanding of good PLM practices, and vice versa. Hence, the question being examined in this paper is: what are the similarities and differences in how BIM and PLM mock-ups are used as a means of preventing OHS risks? Therefore, the expected contribution is to provide a comparative study of the use of BIM and PLM mock-ups for OHS risk prevention. We consider that DMUs basically contain geometric information describing the work environment. Since the literature suggests that geometry alone is not sufficient to conduct specialized analysis (Ferrise et al., 2013), the comparison of how DMUs are used in the construction and manufacturing industries will focus on the "preparation" of

the DMUs for risk analysis. This preparation may include non-geometric information that is integrated in hazard identification. Therefore, this paper focuses on identifying various DMU preparation methods found in the literature, with a focus on the OHS risks generated at the operation stage.

The rest of this paper is structured as follows. Section 2 presents the related works. Section 3 presents the methodology adopted. Section 4 presents a state of the art of how BIM mock-ups are used for risk prevention. Section 5 presents a state of the art of how PLM mock-ups are used for risk prevention. In Section 6, we highlight the similarities and differences in how BIM and PLM mock-ups are used for hazard identification and the scientific opportunities for the integrated operational risk management of industrial buildings. Section 7 concludes the paper.

2. Related Studies

With the advent of BIM, many studies have focused on the use of this technology to improve the health and safety of workers in the construction industry. Martínez-Aires et al. (2018) conducted a systematic literature review on works published between 1981 and 2016 on the topic. The aim of that review was to explore how the management-driven approach to OHS is changing with the use of BIM. They find that BIM is making it possible to identify hazards early, before the start of any on-site activities, through the visual representation of relevant site conditions, the 4D schedule and the sequencing of site logistics. Fargnoli and Lombardi (2020) conducted a systematic literature review of works published between 2010 and 2019 with the objective of highlighting the roles played by BIM-based tools for OHS purposes. It emerges from their work that BIM-based tools that are used for OHS purposes target eight main areas: (1) information provision through knowledge-based systems, (2) safety rule codification for automatic rule-checking, (3) the release / communication of information, (4) overlap and clash resolution, (5) real-time warning and feedback, (6) worker training, (7) stakeholders' perception of the advantages of using BIM for construction safety, and (8) workers' behavior. However, the shortcoming of those studies, as noted by Forsythe (2014), is that they are mainly focused on the design phase, without anticipating the unexpected dynamics of construction and

related human behavior. Forsythe (2014) therefore reviews the literature on proactive technologies (e.g., movement sensors housed in a safety helmet) that are combined with BIM mock-ups and used during the construction phase. He also identifies scientific opportunities for improving the HF/E of the proactive technologies used to promote their acceptance by workers in daily work situations.

Since provincial OHS statutes recommend eliminating risks at the source, we wonder if it is possible to better integrate the dynamic nature of construction and operational activities and interactions between humans, tasks, and tools/equipment earlier in the design through better preparation of BIM mock-ups?

Some recent research recommends relying on the best practices observed in PLM applications to break through the barrier that still stands in the way of better deployment of BIM (Aram & Eastman, 2013 ; Boton, Rivest, Forgues, & Jupp, 2016). For example, Jupp (2013) established that PLM's core functions can effectively be used to address the impediments encountered when trying to fully implement BIM in construction projects. Besides that, some authors have noted that some differences can be observed in BIM and PLM model use for OHS purposes. For example, when it comes to using BIM and PLM mock-ups coupled with VR technologies, Getuli et al. (2020) noted that in the construction industry, current research focuses mainly on visualization and immersive capabilities, while in manufacturing industry, these technologies are used to effectively simulate assembly tasks in an HF/E approach to workplace design.

Therefore, to take advantage of the manufacturing industry's experience with using PLM mock-ups for OSH risk prevention, we investigate in this paper the use of both DMUs (BIM and PLM) as a means of preventing OHS risks.

3. Research methodology

We based our literature review on works published between 2010 and 2020. The databases we consulted are: Engineering Village, Scopus, and ScienceDirect. We used the following keywords in English: *BIM, PLM, digital mock-up, design, plant, building, operation,*

construction, occupational health, safety, prevention, hazard, recognition, identification, engineering process, prevention through design, and automation. The list of references was then supplemented by the snowball effect and refined based on summary analysis. When analyzing the summary, we kept in mind two main aspects of our topic: the digital mock-up aspect, and the hazard identification / risk prevention aspect. All articles that dealt with one aspect without addressing the other were automatically rejected. Those that specifically addressed the risks associated with the stability of temporary structures were rejected, as were publications that dealt with risks related to collaboration between humans and robots in the manufacturing industry. We kept only articles whose objectives included OHS hazards or risks and at least one of the two kinds of mock-ups that we are comparing. This analysis enabled us to classify the references according to the prevention objectives that they targeted (the type of hazard to be identified) and the phases of the project life cycle during which they are used. Finally, an in-depth analysis of the references selected made it possible to identify the non-geometric information integrated in hazard identification. That is what is shown in the "Type of additional information" column in Table 1. The comparative analysis was supported by the following elements characterizing work situations (Division Santé et sécurité au travail, 2010): task sequence as prescribed, task schedule, equipment/resources, workplace, and HF/E. Therefore, we discuss and highlight the similarities and differences in how BIM and PLM mock-ups are used for OHS risk prevention.

Tableau – A II-1 Classification of literature integrating BIM and PLM mock-ups as a mean of preventing OHS risks

Approach	Project phase	Source	Type of additional information	Kind of risks identified
BIM Mock-Ups				
3D BIM	Design	Kasirossafar et al., 2012	None	Risks related to initial site configuration (**Occupational Safety**)
4D BIM	Design	Shang and Shen, 2016; Tran and Pham, 2020; Trani et al., 2015; Guevremont and Hammad, 2018; Jin et al., 2019	Construction task schedule	Risks related to the management of construction machinery and vehicles on site (**Occupational Safety**)
3D + Color Code	Design	Cortés-Pérez et al., 2020	OHS regulations	Risks related to the spatial location of 3D BIM objects (**Occupational Safety**)
3D/4D BIM + Specialized Databases	Design	Mihić et al., 2018; Hossain et al., 2018	Construction task schedule + Task sequence + Resources (material and equipment) + Human	Various types of risk (physical, mechanical, chemical, biological, etc.) related to the construction of 3D BIM objects like struck by objects or to the properties of materials to be handled (**Industrial Hygiene, Occupational Safety**)
3D BIM + Knowledge Modeling	Design	Ding et al., 2016; Zhang et al., 2014	Construction task sequence + Task schedule + OHS regulations	Risks related to each task sequence and to different risk factors (**Occupational Safety**)
4D BIM + IoT + Cyber-Physical Systems	Construction	Jiang et al., 2020	Construction task schedule + Worker and equipment movement	The position of workers in relation to hazardous areas and equipment on site (**Occupational Safety**)
4D BIM + IoT + Video Game Technology	Construction	Forsythe, 2014	Construction task schedule + Worker and equipment movement	The position of workers in relation to hazardous areas and equipment on-site (**Occupational Safety**)
3D BIM + Data Transfer Mechanism	Operation	Wetzel and Thabet, 2018	FM hazards related to the location of 3D BIM objects and materials used + Safety procedures	Risks related to falling, being in a harmful area, and being struck-by objects (**Occupational Safety**)
3D BIM + Avatars	Operation	Zhao et al., 2019	Operational task sequence + Time	None
4D BIM + DHM	Design Construction	Golabchi et al., 2018	Construction task schedule + Task sequence + Human–task interaction	Risks related to physical ergonomics (**Ergonomic**)
PLM Mock-Ups				
PLM + DHM	Design Production	Caputo et al., 2019; Illmann et al., 2013; Sanjog et al., 2019	Equipment + Task sequence + Human–task interaction	Risks related to physical ergonomics (**Ergonomic**)
PLM + DHM + Real-Time Motion Capture	Production	Joung et al., 2015	Equipment + Task sequence + Human–task interaction	Risks related to physical ergonomics (**Ergonomic**)
PLM + DHM + VR/AR	Design	Peruzzini et al., 2017b, 2017a	Equipment + Task sequence + Human–task interaction	Risks related to physical ergonomics (**Ergonomic**)
PLM + VR	Design	Ferrise et al. 2013 ; Grajewski, Górski, Zawadzki, & Hamrol, 2013	Equipment + Task sequence + Human–task interaction	Risks related to physical ergonomics (**Ergonomic**)
PLM + HAZOP + Knowledge-Based System	Design	Bragatto et al., 2007	Equipment operation	Risks of equipment malfunction (**Occupational Safety**)
PLM + HAZOP + Cyber-Physical Systems	Production	Lee et al., 2019	Equipment operation	Risks of equipment malfunction (**Occupational Safety**)
PLM + IoT	Production	Gröger et al., 2016; Ziegler et al., 2015	Equipment + Task sequence (operating data for maintenance)	Risks of equipment malfunction (**Occupational Safety**)

4. State of the art of BIM-based approaches for preventing OHS risks

Table 1 highlights two major trends in the BIM universe: approaches that rely essentially on information provided by 3D and 4D models (Guevremont & Hammad, 2019 ; Jin et al., 2019 ; Kasirossafar et al., 2012 ; Shang & Shen, 2016 ; Tran & Pham, 2020 ; Trani et al., 2015), and approaches that find it necessary to add to 3D and 4D models other detailed information that should be relevant for hazard analysis (Forsythe, 2014; Golabchi et al., 2018; Hossain et al., 2018; Jiang et al., 2020; Mihić et al., 2018; Wetzel and Thabet, 2018; Zhang et al., 2014; Zhao et al., 2019).

4.1. Approaches that use information contained in 3D and 4D BIM mock-ups

The first trend in BIM mock-up use for OHS purposes is using the visual information provided by 3D mock-ups. This visual information is essentially geometric shapes, spatial arrangements and the distribution of equipment and materials on site that can be used to virtually visit the site and optimize the management of equipment and dangerous areas (Kasirossafar et al., 2012). However, this virtual site inspection remains frozen in time on the initial site configuration. The task schedule information makes it possible to consider the changing nature of the construction site as work progresses.

This task schedule information is provided by 4D BIM models and can be used in different ways. Shang and Shen (2016) proposed a methodology to valorize task schedule information by forecasting the movement of construction machinery and vehicles on site and then identifying various risks of collision. Tran and Pham (2020) suggest assigning a workspace to each 3D BIM object, linking those workspaces to the 4D schedule, identifying potential conflicts between those workspaces by visualization and adjusting the work schedule accordingly. Trani et al. (2015) recommend taking advantage of the 4D visualization method and the information provided by 4D BIM models about the task schedule and allocated human and material resources to define the different periods during which site configuration does not change. For each of these periods, it would then be easy to safely design the site configuration, organize the sequence of work and assign workspaces to workers for the construction phase.

Guevremont and Hammad (2018), for their part, proposed a methodology to analyze critical activities based on their period and zone by linking 4D simulations and safety planning. Thus, they suggest matching to each critical hazard a generic representation that would be joined to a corresponding hazardous area. It would then be possible to visualize the riskiest areas during a 4D simulation and then evaluate the dangerousness of a 4D scenario based on a statistical analysis of historical safety issues. This makes it possible to apply mitigation measures by altering either the task schedule or the 3D BIM model by adding protective measures.

This being said, it should be noted that the 3D BIM and 4D BIM simulation approaches mainly valorize geometric information and task schedule information to identify occupational safety risks linked to the spatial and temporal disposition of resources on the site.

4.2. Approaches that add information to BIM mock-ups for risk analysis

The additional information that recent studies have tried to add to BIM models essentially pertains to standard operating procedures or task sequences, tools to be handled by workers, and corresponding hazards. For example, Mihić et al. (2018) aim to contribute to the automatic detection of hazards based on BIM mock-ups and developed two interconnected databases: one containing construction sector hazard information and the other containing the task sequence of construction activities. Zhang et al. (2015) developed a construction safety ontology in which they record and organize safety management information. This information pertains mainly to the construction task sequence, corresponding hazards, mitigation measures, and the safety specifications that govern them. Ding et al. (2016) propose to manage construction risk knowledge by representing it in a structured form in an ontology that would interact with the BIM models by means of a reasoning engine. This would make it possible to quasi-automatically identify the construction hazards and corresponding risk factors that are linked to the construction of each 3D BIM object. And Hossain et al. (2018), among others, developed a rule-based design for safety knowledge library to capture safety knowledge and support the designer during project design. The proposed framework integrates information about the construction activities of each 3D BIM object and the related risks due to a physical

parameter that constrains the BIM object's design (e.g., a beam that could break during lifting due to its length).

During the construction phase, BIM mock-ups can be coupled with proactive technologies such as cyber-physical systems (Jiang et al., 2020) or with video game technology to fuse the 3D BIM model with real-time tracking technology (connected objects that are integrated in workers' PPE and on-site equipment) (Forsythe, 2014). In this example, the additional information that is recorded during the construction phase for risk analysis is workers' position relative to hazardous areas and on-site equipment.

When it comes to the operation phase, the risks faced by maintenance workers is not well addressed in the BIM literature (Martínez-Aires et al., 2018). However, one of the trends that aims to consider risks in the operation phase focuses on the preparation of the BIM mock-up obtained at the end of the construction phase by integrating information that will facilitate its use during the operation phase (Health and Safety Executive, 2018 ; Wetzel & Thabet, 2018). This preparation of the mock-up involves integrating in the mock-up information about the safety maintenance procedure and potential hazards related to 3D BIM objects. In addition to those works, we note the one by Zhao et al. (2019) that, without aiming to analyze the risks associated with a building's operation phase, lays the foundation for simulating human activities in interior spaces during the design phase. They propose to use avatars from video game technology to simulate daily activities in the BIM mock-up of an indoor environment. Thus, they suggest using a BIM editor to assign 3D BIM objects interaction property information (e.g., "sittable" for a chair or a bed) and a task planner to assign virtual agents the task sequence reflecting their daily objectives and allow them to interact with 3D BIM objects.

5. State of the art of PLM-based approaches for preventing OHS risks

The trends in PLM mock-up use for OHS risk prevention have two main interests: simulating interactions between humans and their workstations (Caputo et al., 2019 ; Ferrise et al., 2013 ; Grajewski et al., 2013 ; Joung et al., 2015 ; Peruzzini, Carassai, & Pellicciari, 2017 ; Peruzzini, Carassai, Pellicciari, et al., 2017 ; Sanjog et al., 2019), and using plant mock-ups to manage

machine safety risks (Bragatto et al., 2007 ; Gröger et al., 2016 ; Lee et al., 2019 ; Ziegler et al., 2015).

5.1. Approaches that use PLM mock-ups and virtual mannequins to simulate interactions between humans and their workstations

The manufacturing industry has made great strides in using PLM mock-ups for safe workplace design. The identification of hazards is perceived as anticipation of hazardous scenarios (Cameron et al., 2017), with the objective being to virtually simulate the behavior of all components of the production system, ranging from machines to humans (Joung et al., 2015). Caputo et al. (2019) therefore propose a methodology to introduce DHM in a virtual scenario and identify HF/E risks using the EAWSdigital (European Assessment Work Sheet) by methods-time measurement. This approach incorporates hazard identification information on so-called P3RH: products, plants, processes, resources, and humans (Joung et al., 2015). It then makes it possible to identify HF/E risks linked to work postures, the forces to be exerted, the manual handling of materials and the repetitive movement of upper limbs. However, it has two drawbacks: the relative immobility of the mannequin (Illmann et al., 2013 ; Joung et al., 2015) and the simplification of human behavior (Ferrise et al., 2013).

To solve the deficiencies associated with the immobility of the virtual mannequin, Joung et al. (2015) propose a methodology to add information about the worker to the above P3RH information by using motion sensors to capture the movement of the real worker in the factory and attach it to the virtual mannequin. However, Joung et al. (2015) used this HF/E risk analysis for a plant in the production phase. To prevent HF/E risks during the design phase, Peruzzini et al. (2017b) propose a methodology that couples PLM mock-ups of products and virtual humans to a real human by means of virtual reality (VR) , and Peruzzini et al. (2017a) propose a methodology that couples PLM mock-ups of products and virtual humans to a real human by means of mixed reality (VR + augmented reality). Once implemented, “the methodology makes it possible to realize five mains analysis: postures, occlusion (visibility and accessibility), mental load, interactions and emotions” (Peruzzini et al.; 2017b). However,

a shortcoming due to the simplification of interactions between the human and products remains.

According to Ferrise et al. (2013), resolving this shortcoming linked to the approximation of human–product interactions using a virtual human constitutes the basis of the latest technological development in PLM mock-ups. They therefore introduce the concept of interactive virtual prototypes, which refers to the preparation of mock-ups by integrating the information needed to model human–tool gestural interactions (Nadeau & Landau, 2018) and information about the dynamic behavior of objects (Xiong, Wang, Huang, & Xu, 2016) when they interact with humans. This mock-up preparation makes it possible to transcribe the product model into sensations that are accessible to real humans via the multimodal and multisensory interfaces offered by VR and AR technologies (for example, a MOOG HapticMaster 3DOF haptic device makes it possible to provide force-feedback to the human who is interacting with the virtual product). Grajewski et al. (2013) in turn introduce the notion of "virtual aided design" for HF/E workplace design. This notion also refers to the ability of virtual prototypes of products and workplaces to be tested by real humans by means of VR and haptic technologies.

Thus, PLM-based approaches harness detailed product, process, resource, and human information that is necessary to simulate task sequencing on an individual scale. This makes it possible to identify HF/E risks. These approaches are mainly used during the design phase.

5.2. Approaches that use PLM mock-ups to manage machine safety risks

In addition to the approaches that tend to simulate work situations during the design phase by integrating humans or DHMs in virtual scenes, other approaches that date back to the 1990s are based on process simulation without including humans (Cameron et al., 2017). These are mostly used to automate the main traditional methods of hazard identification: HAZOP and FMEAC, which are generally built on knowledge-based systems in which we can record relevant information about the operating modes of equipment and, in turn, their malfunction modes or deviations. By considering their relative arrangement in the plant and their functional

connections, it is then possible to identify hazardous scenarios specific to a particular plant and instrumentation diagram using a reasoning engine and thus support the OHS practitioner investigating the system behavior (Lee et al., 2019) and then complete hazard identification (Bragatto et al., 2007).

During the production phase, tools are put in place to monitor workers and the operating mode of machines in real time. With the introduction of Industry 4.0, there is a wide variety of these types of OHS risk prevention tools. Work equipment uses cyber-physical systems to self-monitor their operational safety (Gröger et al., 2016). Sensors are used to alert workers in real time of the possible presence of a risk (Nadeau & Landau, 2018). Other tools such as smartwatches are also used to collect data about the operational safety of plant equipment and provide work procedures to assist workers in performing theirs tasks (Gröger et al., 2016 ; Ziegler et al., 2015). This makes it possible, to mitigate risks linked to machine safety during the production phase.

6. Discussion

Considering the previous analysis, it is apparent that researchers tried to integrate in the hazard identification process based on the two types of DMUs (BIM and PLM), P3RH information and do so at different scales. That is why they contribute to identifying different kind of risks: mainly occupational safety risks for BIM-based approaches and mainly HF/E risks for PLM-based approaches. More specifically:

(1) While BIM mock-ups using 4D simulation have attempted to reproduce hazardous scenarios at the construction site scale (thus, at the entire workplace scale), PLM mock-ups reproduce hazardous scenarios on a smaller scale, at the scale of an individual workstation. This is apparent in the fact that the 4D scenarios as presented in section 4.1 aim primarily to identify the conflicts that could arise between the spaces that are allocated to different resources as the project progresses. Therefore, the task schedule is the main non-geometric information that is added to the geometric information. While the PLM-based approaches rely mainly on information about task sequences and

HF/E (people's physical and mental capacities), which makes it possible to define the interactions to be simulated between humans, tasks, and resources.

(2) The construction industry also needs to be able to replicate smaller-scale hazardous scenarios. This is probably why recent studies have tried to record in databases detailed information about task sequences and related hazards.

(3) In the construction industry, the trend in research is to try to support designers in their decision-making by attempting to provide them with information about mitigation measures and OHS specifications with the objective of automating the hazard identification process and design verification.

It appears that for the operation stage of an industrial building, we can rely on the BIM-based management approaches of OHS to provide mitigation measures to occupational safety risks to which workers will be exposed due to the complexity of their working environment and we can rely on the PLM-based management approaches to provide mitigation measures to occupational safety risks due to the interaction between workers and industrial equipment and to HF/E risks to which workers will be exposed due to the requirements of the prescribed task to perform. Thus, we can join Fortineau et al. (2019) in their thought that "despite the fact that the businesses of AEC (targeted by BIM) and classical industrial sectors (aerospace, automotive, steel industry) are slightly different, there are similarities and connection points that will hopefully make BIM and PLM systems more cooperative in the future".

7. Conclusion

Our objective was to identify the similarities and differences in how BIM and PLM mock-ups are used for OHS risk prevention. We conducted a literature review of works published between 2010 and 2020 on Engineering Village, Scopus and ScienceDirect pertaining to the use of BIM or PLM mock-ups for OHS risk prevention. The analysis we carried out afterwards focused mainly on digitalized information used to replicate work situations and then identify dangerous scenarios. The characteristic elements guiding our analysis were task sequence, task schedule, equipment/resources, workplace, and HF/E. We also identify the kind of risks that each approach makes it possible to identify. On one hand, BIM-based approaches mainly

integrate task schedule information and combine it with geometric information to identify occupational safety risks by replicating hazardous scenarios at the construction site scale. On the other hand, PLM-based approaches mainly integrate task sequence and human information to simulate interactions between humans, tasks, and resources at the individual workstation scale. Then, it presents a scientific opportunity to provide a mixture of the two approaches to better integrate the dynamic nature of construction and operational activities and interaction between human and their tasks in hazard identification process, particularly for the operation of industrial buildings. Thus, we think that the subsequent risk mitigation measures may be more systemic and sustainable.

Acknowledgements

The authors would like to thank the industrial partner, NSERC and ETS for their support of this research project.

LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aram, S., & Eastman, C. M. (2013). Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry. Communication présentée au 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining; Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada. https://doi.org/10.22260/ISARC2013/0115

Badiane, A., Nadeau, S., Kenné, J.-P., & Polotski, V. (2016). Optimizing production while reducing machinery lockout/tagout circumvention possibilities. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *22*(2), 188-201. https://doi.org/10.1108/JQME-04-2014-0015

Berard, O., & Karlshoej, J. (2012). Information delivery manuals to integrate building product information into design. *J. Inf. Technol. Constr.*, *17*, 63-74.

BIT. (2019). La sécurité et la Santé au coeur de l'avenir du travail. Repéré à https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms_686765.pdf

Blondin-Seguineau, C. (2007). *Evaluation des risques professionnels, le guide* (Afnor). (S.l.) : (s.n.).

Bodein, Y., Rose, B., & Caillaud, E. (2009). Improving CAD Performance: A Decisional Model for Knowledgeware Implementation. Communication présentée au Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 8, Design Information and Knowledge, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009.

Boton, C., Rivest, L., Forgues, D., & Jupp, J. R. (2016). Comparing PLM and BIM from the Product Structure Standpoint. Dans R. Harik, L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard, & A. Bouras (Éds), *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries* (pp. 443-453). Cham : Springer International Publishing.

Bourgeois, F. (2006). *Troubles musculosquelettiques et travail: quand la santé interroge l'organisation*. (S.l.) : ANACT. Repéré à https://books.google.ca/books?id=bYnDPAAACAAJ

Bragatto, P., Monti, M., Giannini, F., & Ansaldi, S. (2007). Exploiting process plant digital representation for risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *20*(1), 69-78. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.10.005

Brahmi, R., Hammadi, M., Aifaoui, N., & Choley, J.-Y. (2021). CAD-MBSE interoperability for the checking of design requirements. Dans *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)* (pp. 1446-1451). Monastir, Tunisia : IEEE. https://doi.org/10.1109/SSD52085.2021.9429472

Bugaris, R. M. (2017). Improving Electrical Safety in the Workplace: Applying Prevention Through Design to Voltage Testing. *IEEE Industry Applications Magazine*, *23*(3), 12-23. https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600724

buildingSMART. (2018). Rapport d'analyse : Les systèmes de classification et le BIM. buildingSMART France-Mediaconstruct.

Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Nokra, A., & Ben Mosbah, A. (2021). Safety in the Quebec construction industry: An overview of and possible improvements in hazardous energy control using lockout on construction sites by electricians, pipefitters, refrigeration mechanics and construction millwrights. *Safety Science*, *144*, 105468. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105468

Cameron, I., Mannan, S., Németh, E., Park, S., Pasman, H., Rogers, W., & Seligmann, B. (2017). Process hazard analysis, hazard identification and scenario definition: Are the conventional tools sufficient, or should and can we do much better? *Process Safety and Environmental Protection*, *110*, 53-70. https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.025

Caputo, F., Greco, A., Fera, M., Caiazzo, G., & Spada, S. (2019). Simulation Techniques for Ergonomic Performance Evaluation of Manual Workplaces During Preliminary Design Phase. Dans S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Éds), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)* (pp. 170-180). Cham : Springer International Publishing.

Catic, A., & Malmqvist, J. (2007). Towards Integration of KBE and PLM, International conference on engineering design, ICED07 28 - 31 AUGUST 2007.

Chinniah, Y., Gauthier, F., Abdul-Nour, G., Jocelyn, S., Aucourt, B., & Bordeleau, G. (2019, décembre). Étude exploratoire sur les pratiques des fabricants de machines au Québec en lien avec l'intégration de la sécurité des machines dès leur conception. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en Sécurité du travail (IRSST).

Ciattaglia, S., Federici, G., Barucca, L., de Magistris, M., Gaio, E., Gliss, C., … Tarallo, A. (2021). Key EU DEMO plant and building layout criteria. *Fusion Engineering and Design*, *171*, 112567. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112567

CIEHF. (2022). *Human Factors in Highly Automated Systems*. Chartered Institute of Ergonomics & Human Factors. Repéré à https://ergonomics.org.uk/resource/human-factors-in-highly-automated-systems-white-paper.html

CNESST. (2020). Statistiques 2019. Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Corréard, I., Anaya, P., & Brun, P. (2010). *Sécurité, hygiène et risques professionnels*. Paris : Dunod.

Cortés-Pérez, J. P., Cortés-Pérez, A., & Prieto-Muriel, P. (2020). BIM-integrated management of occupational hazards in building construction and maintenance. *Automation in Construction*, *113*, 103115. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103115

Dakwat, A. L., & Villani, E. (2018). System safety assessment based on STPA and model checking. *Safety Science*, *109*, 130-143. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.009

Dassault Systemes. (2009). CATIA V5 Training - Knowledge Advisor.

de Galvez, N., Marsot, J., Martin, P., Siadat, A., & Etienne, A. (2017). EZID: A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers. *Safety Science*, *95*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.02.001

Desjardins-David, I., & Arteau, J. (2009). Méthodologie d'analyse des solutions SST pour convaincre les différents intervenants. *Revue Internationale sur l'lngénierie des Risques Industriels*, *2*(nº 1), 1-14.

Dieter Ziethen. (2013). *CATIA V5 Macro Programming with Visual Basic Script*. (S.l.) : McGraw-Hill Professional. https://doi.org/10.1036/9780071800037

Ding, L. Y., Zhong, B. T., Wu, S., & Luo, H. B. (2016). Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology. *Safety Science*, *87*, 202-213. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.04.008

Division Santé et sécurité au travail. (2010). Identification des dangers et analyse de risques : Guide de référence. Direction du soutien à la gestion de la présence au travail.

Eastman, C. M. (Éd.). (2011). *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors* (2. ed). Hoboken, NJ : Wiley.

Eastman, C. M., Lee, J., Jeong, Y., & Lee, J. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, *18*(8), 1011-1033. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002

Emami-Mehrgani, B., Kenné, J.-P., & Nadeau, S. (2013). Lockout/tagout and optimal production control policies in failure-prone non-homogenous transfer lines with passive redundancy. *International Journal of Production Research*, *51*(4), 1006-1023. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.662305

European Commission. (2013). *Factories of the future :multi annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020.* LU : Publications Office. Repéré à https://data.europa.eu/doi/10.2777/29815

Fargnoli, M., & Lombardi, M. (2020). Building Information Modelling (BIM) to Enhance Occupational Safety in Construction Activities: Research Trends Emerging from One Decade of Studies. *Buildings*, *10*(6), 98. https://doi.org/10.3390/buildings10060098

Farsi, M. A., & Arezoo, B. (2009). Feature recognition and design advisory system for sheet metal components. Communication présentée au 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13-15, 2009, Karabuk, Turkey.

Ferrise, F., Bordegoni, M., & Cugini, U. (2013). Interactive Virtual Prototypes for Testing the Interaction with new Products. *Computer-Aided Design and Applications*, *10*(3), 515-525. https://doi.org/10.3722/cadaps.2013.515-525

Floyd II, H. L., & Valdes, M. E. (2021). Leveraging Prevention Through Design Principles (PtD) in Electrical Installations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *57*(2), 1212-1221. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3046707

Forsythe, P. (2014). Proactive construction safety systems and the human factor. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, *167*(5), 242-252. https://doi.org/10.1680/mpal.13.00055

Fortineau, V., Paviot, T., & Lamouri, S. (2019). Automated business rules and requirements to enrich product-centric information. *Computers in Industry*, *104*, 22-33. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.001

Fytrou-Moschopoulou, A. (2016). Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. *Build Up*. [Text]. Repéré à https://www.buildup.eu/en/practices/publications/shaping-future-construction-breakthrough-mindset-and-technology-0

Gagnon, Y.-Chantal. (2012). *L'etude de cas comme methode de recherche* (2nd ed.). Quebec : Presses de l'Universite du Quebec. Repéré à http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=578107

Gallab, M., Bouloiz, H., & Tkiouat, M. (2015). Decision support for occupational risk overcome in maintenance activities. Dans *2015 Science and Information Conference (SAI)* (pp. 426-434). London, United Kingdom : IEEE. https://doi.org/10.1109/SAI.2015.7237177

Getuli, V., Capone, P., Bruttini, A., & Isaac, S. (2020). BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. *Automation in Construction*, *114*, 103160. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103160

Getuli, V., Ventura, S. M., Capone, P., & Ciribini, A. L. C. (2017). BIM-based Code Checking for Construction Health and Safety. *Procedia Engineering*, *196*, 454-461. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.224

Giraud, L. & IRSST (Québec). (2008). *La maintenance: état de la connaissance et étude exploratoire*. Montréal, Que. : Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec. Repéré à http://www.deslibris.ca/ID/215654

Golabchi, A., Han, S., & AbouRizk, S. (2018). A simulation and visualization-based framework of labor efficiency and safety analysis for prevention through design and planning. *Automation in Construction*, *96*, 310-323. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.001

Grajewski, D., Górski, F., Zawadzki, P., & Hamrol, A. (2013). Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces. *Procedia Computer Science*, *25*, 289-301. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.035

Gröger, C., Kassner, L., Hoos, E., Königsberger, J., Kiefer, C., Silcher, S., & Mitschang, B. (2016). The Data-driven Factory - Leveraging Big Industrial Data for Agile, Learning and Human-centric Manufacturing: Dans *Proceedings of the 18th International Conference on Enterprise Information Systems* (pp. 40-52). Rome, Italy : SCITEPRESS - Science and and Technology Publications. https://doi.org/10.5220/0005831500400052

Groupe CSA. (2020). *Maîtrise des énergies dangereuses : cadenassage et autres méthodes*. Mississauga (Ontario) : Groupe CSA. Repéré à https://www.csagroup.org/fr/store/product/CSA%20Z460:20/

Guérin, F., Laville, A., Daniellou, F., Duraffourg, J., & Kerguelen, A. (2007). *Comprendre le travail pour le transformer: la pratique de l'ergonomie*. Lyon : ANACT.

Guevremont, M., & Hammad, A. (2019). 4D Simulation Considering Adjusted Schedules for Safety Planning in Hydroelectric Projects. Dans *Proceedings of the 26th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)* (Vol. 1-2394). Leuven, Belgium.

Health and Safety Executive. (2018). Improving Health and Safety Outcomes in Construction: Making the Case for Building Information Modelling (BIM), 43.

Hevner, March, Park, & Ram. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly, Management Information Systems Research Center, University of Minnesota*, *28*(1), 75. https://doi.org/10.2307/25148625

Hjelseth, E. (2016). Classification of BIM-based model checking concepts. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Special issue: CIB W78 2015 Special track on Compliance Checking*, *21*, 354-369. http://www.itcon.org/2016/23

Hjelseth, Eilif, & Nisbet, N. N. (2011). Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology. Dans *Proceedings of the CIB W78-W102 : International Conference –Sophia Antipolis, France*.

Hossain, Md. A., Abbott, E. L. S., & Chua, D. K. H. (2017). Design for Safety knowledge-based BIM-integrated risk register system. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, *4*(1). https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2017.46

Hossain, Md. A., Abbott, E. L. S., Chua, D. K. H., Nguyen, T. Q., & Goh, Y. M. (2018). Design-for-Safety knowledge library for BIM-integrated safety risk reviews. *Automation in Construction*, *94*, 290-302. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.010

Hovanec, M., Korba, P., & Solc, M. (2015). Tecnomatix for successful application in the area of simulation manufacturing and ergonomics (Vol. Book2 Vol. 1, pp. 347-352). Communication présentée au 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, www.sgem.org, SGEM2015 Conference Proceedings. https://doi.org/DOI: 10.5593/SGEM2015/B21/S7.043

Huet, A., Pinquie, R., Veron, P., Segonds, F., & Fau, V. (2022). Design rules application in manufacturing industries: a state of the art survey and proposal of a context-aware approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *16*(1), 317-322. https://doi.org/10.1007/s12008-021-00821-w

Illmann, B., Fritzsche, L., Leidholdt, W., Bauer, S., & Dietrich, M. (2013). Application and Future Developments of EMA in Digital Production Planning and Ergonomics. Dans V. G. Duffy (Éd.), *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Human Body Modeling and Ergonomics* (pp. 66-75). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

IST. (2007). *Introduction à l'hygiène du travail: un support de formation*. (S.l.) : Institut universitaire romand de santé au Travail. Repéré à https://books.google.cm/books?id=jlSJzQEACAAJ

Jacquetin, F. (2017). *Prévenir les risques professionnels: un enjeu économique pour l'entreprise*. Paris : EUROGIP.

Jiang, W., Ding, L., & Zhou, C. (2020). Cyber physical system for safety management in smart construction site. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *ahead-of-print*(ahead-of-print). https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0578

Jin, Z., Gambatese, J., Liu, D., & Dharmapalan, V. (2019). Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *26*(11), 2637-2654. https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2018-0379

Joung, Y.-K., Li, Q., & Noh, S. D. (2015). XML-based neutral schema for automated ergonomic analysis with digital human simulation and inline motion capture. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-17. https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.972459

Junior, J. C. da S. F., Macada, A. C., Brinkhues, R., & Montesdioca, G. P. Z. (2016). Digital Capabilities as Driver to Digital Business Performance. Dans *AMCIS*.

Jupp, J. R. (2013). Incomplete BIM Implementation: Exploring Challenges and the Role of Product Lifecycle Management Functions. Dans A. Bernard, L. Rivest, & D. Dutta (Éds), *Product Lifecycle Management for Society* (pp. 630-640). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

Jupp, J. R. (2016). Cross industry learning: a comparative study of product lifecycle management and building information modelling. *International Journal of Product Lifecycle Management*, *9*(3), 258. https://doi.org/10.1504/IJPLM.2016.080502

Jupp, J. R., & Singh, V. (2016). Editorial: A PLM perspective of BIM research initiatives, *9*(3), 180-197.

Karimi, B., Chinniah, Y., Burlet-Vienney, D., & Aucourt, B. (2018). Qualitative study on the control of hazardous energy on machinery using lockout and alternative methods. *Safety Science*, *107*, 22-34. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.005

Kasirossafar, M., Ardeshir, A., & Shahandashti, R. L. (2012). Developing the Sustainable Design with PtD Using 3D/4D BIM Tools.

Khan, N., Ali, A. K., Van-Tien Tran, S., Lee, D., & Park, C. (2020). Visual Language-Aided Construction Fire Safety Planning Approach in Building Information Modeling. *Applied Sciences*, *10*(5), 1704. https://doi.org/10.3390/app10051704

Larouzée, J., Guarnieri, F., & Besnard, D. (2014). Le modèle de l'erreur humaine de James Reason (p. 44p.). Communication présentée au CRC_WP_2014_24,MINESParisTech.

Lee, J., Cameron, I., & Hassall, M. (2019). Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0? *Process Safety and Environmental Protection*, *132*, 325-339. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.021

Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2015). *Practical research: planning and design* (Eleventh edition, global edition). Boston Columbus Indianapolis New York : Pearson.

Leveson, N. G., & Thomas, J. P. (2018). *STPA Handbook* (MIT). (S.l.) : (s.n.). Repéré à https://psas.scripts.mit.edu/home/get_file.php?name=STPA_handbook.pdf

Leygonie, R., Motamedi, A., & Iordanova, I. (2022). Development of quality improvement procedures and tools for facility management BIM. *Developments in the Built Environment*, 100075. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100075

Lu, Y., Li, Q., Zhou, Z., & Deng, Y. (2015). Ontology-based knowledge modeling for automated construction safety checking. *Safety Science*, *79*, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.05.008

Malsane, S., Matthews, J., Lockley, S., Love, P. E. D., & Greenwood, D. (2015). Development of an object model for automated compliance checking. *Automation in Construction*, *49*, 51-58. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.004

Mansdorf, S. Z. (Éd.). (2019). *Handbook of occupational safety and health* (Third edition). Boca Raton, Florida : Wiley.

Marchioni, V. (2018). Évaluation du niveau de développement des maquettes numériques du BIM pour les entrepreneurs spécialisés de la construction au Québec. École de technologie supérieure, Université du Québec.

Margossian, N. (2006). *Risques professionnels: caractéristiques, réglementation, prévention* (2e éd. [mise à jour avec les nouvelles directives européennes]). Paris : « L'Usine nouvelle » Dunod.

Martínez-Aires, M. D., López-Alonso, M., & Martínez-Rojas, M. (2018). Building information modeling and safety management: A systematic review. *Safety Science*, *101*, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.015

Matsuoka, S., & Muraki, M. (2001). Computer-aided planning for lockout/tagout program. *Process Safety Progress*, *20*(2), 130-135. https://doi.org/10.1002/prs.680200210

Mick, T., Means, K., Etherton, J., Powers, J., & McKenzie, E. A. (2005). Design Recommendations for Controlling the Jam-Clearing Hazard on Recycling Industry Balers. Dans *Engineering/Technology Management* (pp. 133-137). Orlando, Florida, USA : ASMEDC. https://doi.org/10.1115/IMECE2005-79699

Mihić, M. (2018). Incorporation of health and safety into building information modelling through hazard integration system. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13432.90888

Mihić, M., Cerić, A., & Završki, I. (2018). Developing Construction Hazard Database for Automated Hazard Identification Process. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, *25*(6). https://doi.org/10.17559/TV-20180417105624

Monod, H., & Kapitaniak, B. (2003). *Ergonomie* (2e éd). Paris : Masson.

Nadeau, S., Kenné, J.-P., Emami-Mehrgani, B., & Badri, A. (2016). Advances in integration of equipment lockout/tagout, determination of actual production capacity and production/maintenance planning. *Safety Science Monitor*, *19*(2).

Nadeau, S., & Landau, K. (2018). Utility, Advantages and Challenges of Digital Technologies in the Manufacturing Sector. Ergonomics Int J 2018, 2(6): 000188., 15.

Naeini, A. M., & Nadeau, S. (2022). Application of FRAM to perform Risk Analysis of the Introduction of a Data Glove to Assembly Tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *74*, 102285. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102285

Nawari, N. O. (2018). *Building Information Modeling: Automated Code Checking and Compliance Processes* (1re éd.). (S.l.) : CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351200998

Peruzzini, M., Carassai, S., & Pellicciari, M. (2017). The Benefits of Human-centred Design in Industrial Practices: Re-design of Workstations in Pipe Industry. *Procedia Manufacturing*, *11*, 1247-1254. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.251

Peruzzini, M., Carassai, S., Pellicciari, M., & Andrisano, A. O. (2017). Human-centred design of ergonomic workstations on interactive digital mock-ups. Dans B. Eynard, V. Nigrelli, S. M. Oliveri, G. Peris-Fajarnes, & S. Rizzuti (Éds), *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing : Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2016), 14-16 September, 2016, Catania, Italy* (pp. 1187-1195). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_119

Poisson, P., Chinniah, Y., & Jocelyn, S. (2016). Design of a safety control system to improve the verification step in machinery lockout procedures: A case study. *Reliability Engineering & System Safety*, *156*, 266-276. https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.07.016

Purao, S. (2021). Design Science Research Problems … Where Do They Come From? Dans L. Chandra Kruse, S. Seidel, & G. I. Hausvik (Éds), *The Next Wave of Sociotechnical Design* (Vol. 12807, pp. 99-111). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82405-1_12

Qi, J., Issa, R. R. A., Hinze, J., & Olbina, S. (2011). Integration of Safety in Design through the Use of Building Information Modeling. Dans *Computing in Civil Engineering (2011)* (pp. 698-705). Miami, Florida, United States : American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/41182(416)86

Raymond, L., Leclerc, L., Parent, R., & Desmarais, L. (2009). *Coffre à outils sur le transfert de connaissances appliqué au secteur de l'environnement : une approche proactive* (1re éd.). Montréal : EnviroCompétences.

Reddy, E. J., Sridhar, C. N. V., & Rangadu, V. P. (2015). Knowledge Based Engineering: Notion, Approaches and Future Trends. *American Journal of Intelligent Systems*, *5*, 1-17. https://doi.org/doi:10.5923/j.ajis.20150501.01

Reese, C. D. (2017). *Occupational safety and health: fundamental principles and philosophies*. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group.

Sanjog, J., Patel, T., & Karmakar, S. (2019). Occupational ergonomics research and applied contextual design implementation for an industrial shop-floor workstation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *72*, 188-198. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.05.009

Shang, Z., & Shen, Z. (2016). A Framework for a Site Safety Assessment Model Using Statistical 4D BIM-Based Spatial-Temporal Collision Detection. Dans *Construction Research Congress 2016* (pp. 2187-2196). San Juan, Puerto Rico : American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784479827.218

Siderska, J. (2016). Application of tecnomatix plant simulation for modeling production and logistics processes. *Business, Management and Education*, *14*(1), 64-73. https://doi.org/10.3846/bme.2016.316

Siponen, M., University of Jyväskylä, Faculty of Information Technology, Finland, Soliman, W., University of Jyväskylä, Faculty of Information Technology, Finland, Holtkamp, P., & University of Vaasa, Vaasa, Finland. (2021). Research Perspectives: Reconsidering the Role of Research Method Guidelines for Interpretive, Mixed Methods, and Design Science Research. *Journal of the Association for Information Systems*, *22*(4), 1176-1196. https://doi.org/10.17705/1jais.00692

Song, S., Awolusi, I., & Jiang, Z. (2020). Work-Related Fatalities Analysis through Energy Source Recognition. Dans *Construction Research Congress 2020* (pp. 279-288). Tempe, Arizona : American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784482872.031

Tiaya, C., Nadeau, S., Boton, C., & Rivest, L. (2021). BIM and PLM-Based Management of Occupational Health and Safety: A Comparative Literature Review. *Proceedings of the 38th International Conference of CIB W78*, p. pp 892-901.

Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Classification and Quantification of Human Error in Manufacturing: A Case Study in Complex Manual Assembly. *Applied Sciences*, *11*(2), 749. https://doi.org/10.3390/app11020749

Tran, N. N. T., & Pham, H. L. (2020). 4D BIM Workspace Conflict Detection for Occupational Management A Case Study for Basement Construction Using Bottom Up Method. Dans *Proceedings of the 2020 The 4th International Conference on E-Education, E-Business and E-Technology* (pp. 72-77). Shanghai China : ACM. https://doi.org/10.1145/3404649.3406879

Trani, M. L., Cassano, M., Todaro, D., & Bossi, B. (2015). BIM Level of Detail for Construction Site Design. *Procedia Engineering*, *123*, 581-589. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.111

Vescio, G., Riccobon, P., Grasselli, U., & De Angelis, F. (2015). A Petri Net model for electrical power systems operating procedures. Dans *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-6). https://doi.org/10.1109/RAMS.2015.7105063

Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité, facteurs humains, informatisation*. (S.l.) : Eyrolles. Repéré à

https://books.google.ca/books?id=GjJItQAACAAJ

Warren, D. R., & Saleeb, N. (2020). Improving Productivity by the Automation of Checking of 3D Parametric Modelling. *International Journal of Safety and Security Engineering*, *10*(4), 441-450. https://doi.org/10.18280/ijsse.100402

Wetzel, E. M., & Thabet, W. Y. (2018). A case study towards transferring relevant safety information for facilities maintenance using BIM. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *23*(3), 53-74.

Wu, L. J. (2018). The Development of the Intelligent Checking System for Nuclear Power Plant 3D Model. *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 4668-4673.

Xiong, W., Wang, Q.-H., Huang, Z.-D., & Xu, Z.-J. (2016). A framework for interactive assembly task simulationin virtual environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *85*(5-8), 955-969. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7976-3

Zhang, L., Wu, X., Ding, L., Chen, Y., & Skibniewski, M. J. (2013). Risk Identification Expert System for Metro Construction Based on BIM. Communication présentée au 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining; Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada. https://doi.org/10.22260/ISARC2013/0163

Zhang, L., Wu, X., Ding, L., Skibniewski, M. J., & Lu, Y. (2016). BIM-based risk identification system in tunnel construction. *Journal of civil engineering and management*, *22*(4), 529-539. https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1023348

Zhang, S., Boukamp, F., & Teizer, J. (2014). Ontology-Based Semantic Modeling of Safety Management Knowledge. Dans *Computing in Civil and Building Engineering (2014)* (pp. 2254-2262). Orlando, Florida, United States : American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784413616.280

Zhang, S., Boukamp, F., & Teizer, J. (2015). Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Automation in Construction*, *52*, 29-41. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.005

Zhang, S., Sulankivi, K., Kiviniemi, M., Romo, I., Eastman, C. M., & Teizer, J. (2015). BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. *Safety Science*, *72*, 31-45. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001

Zhang, S., Sulankivi, K., Romo, I., & Eastman, C. M. (2014). BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning | Elsevier Enhanced Reader. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001

Zhang, S., Teizer, J., Lee, J.-K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, *29*, 183-195. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006

Zhang, S., Teizer, J., Perez, E., & McDonald, M. (2013). Automated safety-in-design rule-checking for capital facility projects. Communication présentée au Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 30-31 October 2013, London, UK.

Zhao, Y., Fatemi Pour, F., Golestan, S., & Stroulia, E. (2019). BIM Sim/3D: Multi-Agent Human Activity Simulation in Indoor Spaces. Dans *2019 IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems (SEsCPS)* (pp. 18-24). Montreal, QC, Canada : IEEE. https://doi.org/10.1109/SEsCPS.2019.00011

Zhong, B., & Li, Y. (2015). An Ontological and Semantic Approach for the Construction Risk Inferring and Application. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, *79*(3-4), 449-463. https://doi.org/10.1007/s10846-014-0107-9

Ziegler, J., Heinze, S., & Urbas, L. (2015). The potential of smartwatches to support mobile industrial maintenance tasks. *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 1-7.

Zou, Y., Tuominen, L., Seppänen, O., & Guo, B. H. W. (2019). Visualisation of Risk Information in BIM to Support Risk Mitigation and Communication: Case Studies. Dans I. Mutis & T. Hartmann (Éds), *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering* (pp. 239-246). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_29