

Étude exploratoire des processus de vérification et de validation
de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction au
Québec

par

Isidore Bonaventure TAMO

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

MONTRÉAL, LE 12 JUIN 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur, qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

M. Alexandre Moïse, co-directeur de mémoire
Département de systèmes d'information et méthodes quantitatives de gestion
École de gestion à l'université de Sherbrooke

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

Mme. Ivanka Iordanova, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Guévremont, examinateur externe
Groupe Infrastructures et Système Énergétique, Hydro-Québec

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

LE 23 MAI 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

Étude exploratoire des processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction au Québec

Isidore Bonaventure TAMO

RÉSUMÉ

Les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie doivent être adaptés à la réalité du contexte *Building Information Modelling* (BIM) où l'utilisation d'outils informatiques exigent de nouvelles façons de faire. Des travaux antérieurs ont constaté que certains ingénieurs hésitent à authentifier leurs documents d'ingénierie parce que le périmètre et les limites de la validation semblent flous et ambigus. On se demande donc, dans ce projet de recherche, comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil en vue de leur authentification. Le but de ce projet est de documenter les processus de vérification et validation (V&V) de documents d'ingénierie en construction. L'étude contribue à cerner les limites et le périmètre de la V&V et ainsi à poser des bases pour de futures recherches plus approfondies sur le sujet. Les bases étant de définir les termes de la vérification et de la validation en construction, de recenser et d'analyser les différentes sources littéraires qui décrivent la manière dont se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil. La méthode de la recherche exploratoire est utilisée afin d'adopter une démarche qui permet d'explorer les données de sources diverses constituées de différents types de documents (documents scientifiques, de normes de l'industrie, de guides de pratiques professionnelles) et d'entrevues semi-dirigées. L'analyse croisée des résultats est utilisée dans la partie analyse et discussion pour donner du sens aux résultats obtenus.

Nos résultats révèlent que peu de recherches s'intéressent aux processus de V&V de documents d'ingénierie et qu'il existe des incohérences pour les définitions de V&V dans la littérature scientifique. Les normes de l'industrie de la construction, ainsi que les recommandations de l'Ordre des ingénieurs du Québec à propos du déroulement des processus de V&V de documents d'ingénierie, semblent très génériques. Les ingénieurs rencontrés en entrevue s'accordent plus ou moins sur ce qu'est la V&V de documents d'ingénierie. Le "*model checking*" appliqué en trois phases est le processus de V&V utilisé dans un contexte BIM, mais reste non défini en construction. La norme ISO 19650-2:2018 et le Manuel de pratique canadien pour la modélisation des données du bâtiment (MDB) proposent des illustrations de flux d'activités de contrôle qui ne décrivent pas de façons de procéder. Cette recherche recommande d'étudier des façons de procéder à la vérification et à la validation des documents d'ingénierie.

Mots-clés : documents d'ingénierie, validation, vérification et validation, vérification et validation de modèle, vérification

Exploratory study of engineering document verification and validation processes used in the construction industry in Quebec

Isidore Bonaventure TAMO

ABSTRACT

Engineering document verification and validation (V&V) processes must be adapted for building information modelling (BIM), as its incorporation of computer-based tools requires new ways of doing things. Our previous work found that some engineers are hesitant to validate their engineering documents because they find the contours and limits of the validation process seem vague and ambiguous. We therefore investigate in this study the sequence of events involved in engineering document V&V. The purpose of this project is to document the V&V processes used for construction engineering documents. This study contributes to identifying the limits and contours of V&V and thus laying the foundation for more in-depth research on the subject in the future. It seeks to define the terms *verification* and *validation* for construction, and identifies and analyzes various written sources that describe the sequence of events involved in engineering document V&V processes in the construction industry. The exploratory research method is used to be able to examine data from different types of documents (scientific documents, industry normes, professional practice guides) from a variety of sources as well as semi-structured interviews. A cross-analysis of the results is provided in the analysis and discussion section to give meaning to the results obtained.

The results reveal that little research has been conducted on engineering document V&V processes and that there exist inconsistencies in the definitions of V&V found in the scientific literature. Construction industry normes and OIQ recommendations regarding the sequence of events in V&V processes for engineering documents seem very generic. The engineers interviewed more or less agree on what is meant by "engineering document V&V." Three-phase model checking is the V&V process used in BIM. However, "model checking" is not a defined concept in construction. Standard ISO 19650-2:2018 and the Canadian Practice Manual for BIM contain figures that outline control workflows but do not explain how to proceed. This research recommends examining ways to verify and validate engineering documents.

Keywords: engineering documents, validation, verification and validation, model verification and validation, verification

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Importance de la vérification et de la validation	7
1.2 Vérification et validation selon la littérature scientifique	8
1.2.1 Définitions de vérification et de validation dans un contexte général	8
1.2.2 Généralités sur les processus de vérification et de validation en Construction	10
1.2.3 Le BIM " <i>model checking</i> "	13
1.3 Vérification et Validation selon les normes de l'industrie	16
1.3.1 Définitions de vérification et de validation selon la norme ISO 9001:2015	16
1.3.2 Revue de documents d'ingénierie selon l'ISO 9001:2015	17
1.3.3 Processus de validation BIM selon l'ISO 19650-2:2018	19
1.3.4 Revue selon la norme ISO 19650-2:2018	20
1.4 Vérification et Validation selon les organismes de réglementation du génie	20
1.4.1 Définition des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	20
1.4.2 Contexte de travail de l'ingénieur au Québec	21
1.4.3 La vérification de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	24
1.4.4 La validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	25

1.4.5	L'authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	26
1.4.6	Processus de validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	33
1.4.7	La revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	34
1.5	Synthèse de la revue de la littérature.....	36
1.5.1	Synthèse des définitions de la vérification et de la validation	36
1.5.2	Synthèse des déroulements des processus de vérification et de validation.....	36
1.5.3	Synthèse de l'authentification des documents d'ingénierie.....	37
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE		39
2.1	Introduction	39
2.2	Recherche de type exploratoire	39
2.2.1	Justification du choix de la méthode de recherche	39
2.2.2	Validité des résultats de la recherche.....	40
2.2.3	Analyse des données.....	41
2.3	Choix de la question de la recherche.....	41
2.4	Démarche adoptée pour la collecte de données	42
2.5	Recherche dans les bases de données scientifiques	42
2.5.1	Critères d'évaluation de documents basés sur les titres, résumés et mots clés des articles.....	45
2.5.2	Nombre de références scientifiques recensées pour la vérification, validation ou la vérification et la validation en ingénierie (cas général).....	47
2.5.3	Nombre de résultats pour vérification, validation ou « vérification et validation » en se limitant à l'industrie de la construction.....	48

2.5.4	Nombre de résultats pour vérification, validation ou « vérification et validation » en se limitant au domaine du génie civil	50
2.6	Recherche de normes de l'industrie de la construction.....	51
2.7	Recherche de plans de cours sur les processus de vérification et validation	52
2.7.1	Objectif	52
2.7.2	Démarche utilisée pour repérer les plans de cours.....	53
2.8	Recherche des guides de pratique professionnelle.....	53
2.9	Entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs et les professeurs	54
2.9.1	Entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs.....	54
2.9.2	Entrevues semi-dirigées avec les professeurs de génie civil	55
2.10	Considérations éthiques	56
CHAPITRE 3 RÉSULTATS DE LA RECHERCHE.....		57
3.1	Généralités.....	57
3.2	Résultats liés à l'analyse de la littérature scientifique en ingénierie.....	58
3.2.1	Définitions de vérification et de validation dans un contexte général en ingénierie	58
3.2.2	Résultats liés à l'analyse du déroulement des processus de vérification et de validation en ingénierie	61
3.3	Résultats liés à l'analyse de la littérature scientifique en construction	62
3.3.1	Définition de la vérification et de la validation dans l'industrie de la construction	62
3.3.2	Résultats liés à l'analyse du déroulement du processus de vérification et de validation dans l'industrie de la construction	63
3.3.3	La revue de la conception et la revue de documents de projet dans l'industrie de la construction	68

3.3.4	Authentification de documents d'ingénierie selon la littérature scientifique	69
3.4	Résultats liés à l'analyse des normes de l'industrie	70
3.4.1	Définition de la vérification et la validation selon les normes de l'industrie	70
3.4.2	Résultats liés à l'analyse du déroulement des processus de vérification et de validation selon les normes	72
3.4.3	La revue en ingénierie selon les normes	72
3.5	Résultats liés à l'analyse de documents de guide de pratique professionnelle	74
3.5.1	Contribution de l'ingénieur à l'élaboration de documents d'ingénierie	75
3.5.2	Authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	76
3.5.3	Vérification de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	76
3.5.4	Validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	77
3.5.5	La revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	78
3.6	Les résultats des entrevues	84
3.6.1	Résultats liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs	84
3.6.2	Résultats liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les professeurs de génie civil	88
CHAPITRE 4 ANALYSE ET DISCUSSION		93
4.1	Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique en ingénierie sur les définitions de vérification, de validation et de revue....	93

4.2	Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique en construction sur les définitions de vérification et de validation.....	94
4.3	Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique sur le déroulement des processus de vérification, de validation et de la revue de documents d'ingénierie	95
4.4	Analyse et discussion des résultats de définitions de vérification, de validation et de revue selon les normes de l'industrie	97
4.5	Analyse et discussion des résultats de déroulement des processus de vérification, de validation et revue de documents d'ingénierie selon les normes	99
4.6	Analyse et discussion des résultats tirés des guides de pratiques professionnelles selon les organismes de réglementation du génie	101
4.7	Analyse et discussion des résultats de la revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	102
4.8	Analyse et discussion des résultats de l'authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie	103
4.9	Analyse et discussion des entrevues semi-dirigées	104
4.10	Les limites de la recherche.....	107
	CONCLUSION.....	109
	RECOMMANDATIONS	113
ANNEXE I	DÉCISION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE	115
ANNEXE II	PHASE DE RÉALISATION DES ACTIFS.....	117
ANNEXE III	PRODUCTION COLLABORATIVE DE L'INFORMATION	119
ANNEXE IV	LIVRAISON DU MODÈLE D'INFORMATION	121
ANNEXE V	QUESTIONNAIRE DE L'ENTREVUE AVEC LES INGÉNIEURS.....	124
ANNEXE VI	QUESTIONNAIRE DE L'ENTREVUE AVEC LES PROFESSEURS	125

ANNEXE VII	ORGANISMES DE RÉGLEMENTATION DU GÉNIE AU CANADA	127
ANNEXE VIII	LISTE CONSULTÉE DES ÉCOLES D'INGÉNIEUR DU QUÉBEC.....	129
ANNEXE IX	FLUX DE TRAVAIL DE L'ANALYSE DE L'INGÉNIEUR.....	131
ANNEXE X	GLOBAL VERIFICATION/VALIDATION STEP APPROACH.....	133
ANNEXE XI	CLASSIFICATION OF BMC LEVELS	135
ANNEXE XII	OVERVIEW OF FUNCTIONS IN BMC SOFTWARE	137
ANNEXE XIII	LISTE DE VÉRIFICATION AND SIGNOFF FOR AN INDEPENDENT REVIEW	139
ANNEXE XIV	EXAMPLE OF CLASH DETECTION	141
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	142

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Définitions de documents d'ingénierie 20
Tableau 1.2	Authentification de documents d'ingénierie 27
Tableau 1.3	Définitions des termes associés à l'authentification..... 31
Tableau 2.1	Plan de concepts pour la recherche de documents scientifiques..... 44
Tableau 2.2	Nombre de résultats pour le domaine de l'ingénierie 47
Tableau 2.3	Nombre de résultats pour le domaine de l'industrie de la construction. 49
Tableau 2.4	Nombre de résultats pour le domaine du génie civil..... 50
Tableau 2.5	Résultats de la recherche des normes sur le sujet à l'étude 52
Tableau 3.1	Définitions de la vérification et de la validation dans les domaines numérique et physique 60
Tableau 3.2	Déroulement du "model checking" selon Dimyadi et al. (2016) 64
Tableau 3.3	Concepts de " <i>model checking</i> " selon Hjelseth (2015) 65
Tableau 3.4	Tâches de <i>model checking</i> selon Seiß (2019) 66
Tableau 3.5	<i>BIM information's models inspections</i> selon Makisha (2019) 67
Tableau 3.6	Définition de la vérification et la validation selon les normes..... 71
Tableau 3.7	Guide de pratique professionnelle pour la vérification et la validation. 74
Tableau 3.8	Synthèse des entrevues avec les ingénieurs 87
Tableau 3.9	Synthèse des entrevues avec les professeurs 91

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Cycle de vie type d'un projet de construction 23
Figure 1.2	Authentification de documents d'ingénierie selon APEGA 29
Figure 1.3	Stamping Test according to Engineers Nova Scotia..... 32
Figure 1.4	Procédure type permettant de limiter les retards de validation..... 33
Figure 3.1	<i>Model checking activities</i> 67
Figure 3.2	Exemple de processus de conception..... 73
Figure 3.3	Extract of an Liste de vérification for an independent review 80
Figure 3.4	Exemple d'une matrice de risque..... 81
Figure 3.5	Liste de vérification exemple for an independent review of HRPAAW .. 82
Figure 3.6	Exemple de revue de conception selon l'OIQ 83
Figure 4.1	Différence entre la vérification et la validation à partir de définitions d'ISO 9001 98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEC	Architecture, Engineering & Construction
AIGNB	Association des ingénieurs professionnels et géoscientifiques du Nouveau-Brunswick
ANSI/EIA	American National Normes Institute / Energy Information Administration
APEGA	Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta
Autodesk	Société d'édition de logiciels de création et de contenu numérique, principalement connue comme éditrice du logiciel de conception assistée par ordinateur AutoCAD
BIM	Building Information modelling, Building Information Model, Building Information Management
BMC	BIM-based model checking
C&D	Conception et développement
CAO	Conception assistée par ordinateur ou en anglais CAD pour computer aided design
CER	comité d'éthique de la recherche
CLI	Client
COOR	Coordonateur
DAO	Dessin assisté par ordinateur
DFGA	Direction de la formation générale des adultes
DTN	Dessin technique normalisé
DWG	Drawing
EGBC	Engineers and Geoscientists British Columbia

XVIII

EGM	Engineers Geoscientists Manitoba
ENS	Engineers Nova Scotia
HRPAW	High-Risk Professional Activities or Work
IEC	International Electrotechnical Commission
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
LOD	Level of developpement
MDB	Modélisation des données du bâtiment
MOD	Modeler
NAPEG	Northwest Territories and Nunavut Association of Professional Engineers and Geoscientists
OIQ	Ordre des ingénieurs du Québec
PEGNL	Professional Engineers and Geoscientists of Newfoundland and Labrador
PEI	Association of Professional Engineers of Prince Edward Island
PEO	Professional Engineers Ontario
PWP	Professional work product
SAE	SAE - Society of Automotive Engineers
SMC	Solibri Model Checker
UNI	Unificazione (Italian National Unification Body)

V&V

Vérification et validation

INTRODUCTION

Les processus de conception dans l'industrie de la construction ne cessent d'évoluer afin d'être adaptés aux systèmes à concevoir de plus en plus complexes. Cette situation nécessite d'adapter les processus¹ de vérification et de validation de documents d'ingénierie à un contexte impliquant l'utilisation d'outils informatiques. Selon Stark, Kind, et Neumeyer (2017), certains professionnels de l'architecture privilégient toujours les méthodes traditionnelles, d'où cette affirmation: « *Today's manufacturing system design processes and architecture still are based on traditional engineering methods and can hardly cope with increased system complexity* » (Stark et al., 2017, p. 1).

Dans un processus de conception, l'absence de plans de vérification et de validation combinée à la complexité des systèmes à concevoir peut mener à de sérieuses conséquences. Selon MacLeod (2007), certains exemples d'effondrement d'ouvrage montrent que les erreurs à l'origine de cela auraient pu être évitées si de simples vérifications et validations de modèles ou de documents d'ingénierie avaient été effectuées. Toutefois, la complexité du modèle et les outils disponibles ne permettaient pas toujours de déceler ces erreurs. Un cas d'effondrement est celui du Cleddau Bridge en Grande-Bretagne en 1970. Les outils informatiques étaient rudimentaires pour la validation du type de pont composé de systèmes complexes. Un autre cas d'effondrement est celui de la passerelle de Ramsgate, toujours en Grande-Bretagne, où trois personnes sont mortes à cause d'une hypothèse de forces appliquées aux systèmes, qui n'avait jamais été vérifiée ni validée. Ces exemples concrets montrent l'importance de la vérification et de la validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction.

¹ Processus : « ensemble d'activités corrélées ou en interaction qui utilise des éléments d'entrée pour produire un résultat escompté » (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a)

Selon l'Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ), les documents d'ingénierie sont constitués de tout document produit par un ingénieur dans le cadre de l'exercice des actes d'ingénierie. Dans le cadre de cette recherche, les documents d'ingénierie désignent principalement les livrables issus de la conception de l'ingénieur qui, dans le cas du contexte BIM, sont issus d'une maquette numérique ou modèle 3D. Dans la majorité des cas, il s'agit de plans et devis généralement produits à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur / Dessin assisté par ordinateur (CAO/DAO) ou issus de maquettes numériques dans le cas de modélisation dans un contexte BIM. Un plan est une représentation graphique d'une conception en ingénierie tandis qu'un devis est un document d'ingénierie présentant une description qualitative détaillée des matériaux, équipements, systèmes, spécifications techniques et autres, dans le cadre de travaux à réaliser.

Malgré son importance dans le processus de conception, il arrive que certains ingénieurs éprouvent de l'inconfort à vérifier et à valider leurs documents d'ingénierie dans un contexte impliquant l'utilisation de maquettes numériques. Ce constat a été fait lors de la recherche menée par Falardeau (2020). Les conclusions de la recherche de Falardeau (2020) jettent les bases de la présente recherche. D'après ses constats, il arrive qu'à l'étape de la validation, certains ingénieurs éprouvent de la difficulté, ce qui affecte la prise de responsabilités de documents d'ingénierie quand vient le moment de les authentifier. Selon Falardeau (2020), les ingénieurs donnent quelques arguments pour expliquer cette situation : la complexité des modèles numériques dans le contexte du BIM et le fait que le périmètre et les limites de la validation soient flous. De plus, le BIM offre la possibilité à plusieurs parties prenantes d'un projet de travailler sur le même modèle dans un environnement numérique partagé, ce qui implique que ces participants peuvent avoir modifié ou influé le contenu numérique. Cependant, au Québec, le système juridique est centré sur l'individu et il devient difficile pour les parties prenantes d'avoir confiance et d'authentifier les documents issus du modèle numérique (modèle 3D) dans un environnement commun ou partagé.

Ainsi, l'ingénieur doit pouvoir faire confiance au contenu d'un modèle 3D pour prendre la responsabilité d'un document d'ingénierie issu de celui-ci. Selon Falardeau (2020), les

ingénieurs produisent leurs documents d'ingénierie à partir d'un environnement collaboratif dans lequel les projets sont traités. Il peut alors être difficile d'avoir le contrôle sur l'information intégrée au modèle et de ce fait de vérifier l'intégrité des données qui constitueront les documents d'ingénierie. Il convient, dans une telle situation, de trouver des moyens de produire des documents d'ingénierie qui satisfont aux exigences du projet à l'aide des processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie.

Les processus de vérification et de validation constituent les activités menées par l'ingénieur sur ses documents d'ingénierie avant leur authentification. Dans le contexte québécois, l'ingénieur est tenu de fournir des documents authentifiés qui attestent que ceux-ci ont été produits par un ingénieur en règle auprès de l'OIQ. La revue de documents d'ingénierie et la revue de la conception sont d'autres processus apparentés à la vérification et la validation de documents d'ingénierie, mais exécutés au niveau multidisciplinaire et qui peuvent être réalisés avant ou après l'authentification de documents d'ingénierie. La revue de document d'ingénierie n'est pas effectuée par l'auteur des documents d'ingénierie. Dans cette recherche, on s'intéresse aux processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie par leur auteur en vue d'en prendre la responsabilité pour construction. Dans la littérature scientifique, la vérification est souvent présentée comme un processus pouvant être mené indépendamment de la validation dans le cas de documents d'ingénierie. Cette façon de procéder ne fait pas l'unanimité, car, « *an artificial or dogmatic split-up in applying V&V can become very counterproductive. Treating V&V totally separate has been shown to lead to an explosion of plans and reports for proving compliance with each (derived) requirement* » (Elich, Schreinemakers, & Vullings, 2012, p. 2). Ainsi, les processus de validation et de vérification seront abordés dans ce projet.

Vu le caractère générique des recommandations données en général tant dans la littérature que dans les normes en lien avec le déroulement des processus de vérification et de validation, et vu l'importance de ces processus dans la prise de responsabilité de documents d'ingénierie, plusieurs questions se posent sur leurs déroulements. Un examen de la littérature a permis d'identifier la vérification et la validation comme les actions qu'un ingénieur pouvait poser sur

ses documents d'ingénierie avant leur authentification. Ces actions sont souvent décrites comme étant l'effort combiné des processus de validation et de vérification de documents d'ingénierie dont le périmètre et les limites ne sont pas clairement définis, ceci particulièrement en génie civil comme constaté par Falardeau (2020). Les faits montraient que plusieurs ingénieurs stipulent que les limites et le périmètre de la validation ne sont pas définis et il arrive même qu'à défaut de valider certaines parties de leurs modèles eux-mêmes, ils se retournent vers leurs modeleurs pour le faire. Tout ceci nous conduit à la question suivante qui est d'ailleurs la question de recherche principale : comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil ? Pour mieux répondre à cette question, elle est divisée en trois sous-questions : Quelle définition la littérature donne-t-elle de la vérification et de la validation ? En quoi consistent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction? Et en quoi consiste l'authentification de documents d'ingénierie?

L'objectif principal de ce mémoire est de documenter les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en vue d'en prendre la responsabilité dans un contexte québécois.

Pour répondre aux questions de cette recherche, le mémoire est organisé de la façon suivante : la présente introduction, qui constitue le chapitre 0, présente le sujet abordé. Le chapitre 1, la revue de la littérature, recense les écrits de la littérature scientifique, les normes de l'industrie de la construction et les guides de pratiques professionnelles qui abordent le sujet de vérification et la validation de documents d'ingénierie. Il présente une comparaison des différentes définitions pour vérification et validation trouvées dans la littérature, et recense les différents concepts en lien avec le déroulement des processus de vérification et de validation. Le chapitre 2 présente la méthodologie adoptée pour la présente recherche, justifie les différentes sources d'informations utilisées, la préparation de la collecte d'information et la manière dont ces informations collectées seront utilisées. Les résultats sont présentés au chapitre 3. Ce dernier fournit les résultats de la recherche par type de source de données : la littérature scientifique, la littérature professionnelle et les entrevues semi-dirigées effectuées

dans le cadre de cette recherche. Le chapitre 4 présente une analyse et une discussion des résultats obtenus, c'est-à-dire les informations obtenues des différentes sources de données en lien avec le processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie. Il montre aussi comment les données collectées contribuent à répondre à la question de la recherche et ses sous-questions et se termine par une présentation des forces et faiblesses de la recherche. La conclusion présente une synthèse de cette recherche. Après un rappel de l'objet de la recherche et des questions de recherche, elle poursuit avec la façon dont les réponses aux questions de recherche ont été traitées et les conclusions retenues. La conclusion se termine par une recommandation pour les recherches futures en rapport avec le sujet de vérification et la validation de documents d'ingénierie en génie civil et pistes d'investigation future.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente la recension des écrits en lien avec le déroulement du processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction. Le chapitre débute par un bref retour sur l'importance de la vérification et la validation dans l'industrie de la construction, suivi de définitions souvent utilisées pour décrire les processus de vérification et de validation. Le chapitre présente ensuite les processus de la vérification et de la validation par type de source explorée : la littérature scientifique, les normes et les guides de pratiques professionnelles.

1.1 Importance de la vérification et de la validation

L'ingénieur doit fournir des documents d'ingénierie dont le contenu est complet, non ambigu et dépourvu d'erreur. Les principaux documents d'ingénierie, constitués de plans et devis, sont issus de modèles ou de maquettes numériques. Selon MacLeod (2007), les activités de validation de modèles, de vérification et d'analyse de résultats minimisent les risques qu'il y a à utiliser le modèle. Selon Makisha (2019), ces activités ont été longtemps considérées comme le moyen d'examiner l'adéquation de la conception aux exigences, aux lois et aux documents techniques. L'ingénieur se doit de fournir des documents d'ingénierie exploitables qui répondent à certaines normes. Ceci exige que l'ingénieur adopte une approche intégrant des processus de vérification et de validation, afin de limiter ou minimiser de potentielles erreurs, omissions ou ambiguïtés dans ses documents d'ingénierie.

La vérification et la validation des documents d'ingénierie permettent à l'ingénieur de fournir des solutions économiquement viables. Si on se réfère aux autres domaines qui utilisent les normes de la norme EIA-632 pour la conception de produit, Esteban, Pascal, et Esteve (2009), montrent que « Les contraintes de réduction des coûts de développement et de réduction des délais de mise sur le marché d'un produit imposent des approches de conception rigoureuses.

Ces approches doivent appliquer une méthode qui intègre la vérification et la validation de différentes étapes de conception afin de garantir que le résultat de la conception répond bien aux exigences du cahier des charges » (Esteban et al., 2009).

Cependant, la vérification et la validation ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre à cause de la complexité de certains ouvrages à concevoir dans l'industrie de la construction. Selon Maropoulos et Ceglarek (2010b), « *Complexity in design makes verification and validation even more difficult to apply as part of the design process* » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b, p. 2(741)). Ce qu'avait constaté Falardeau (2020) en lien avec ce que certains ingénieurs affirment: « il y a une complexité supplémentaire qui semble créer un inconfort de validation pour les professionnels puisque le périmètre/les frontières de la validation devient plus ambigu » (Falardeau, 2020, p. 90(108)). Il arrive que certains ingénieurs hésitent à procéder à la validation de certains détails ou partie de leurs conceptions, car « à défaut d'avoir la certitude de valider eux-mêmes tous les détails du modèle 3D, certains ingénieurs signataires font confiance, ou non, à leur modéleur pour valider les détails qu'ils ne peuvent pas valider eux-mêmes » (Falardeau, 2020, p. 92(110)).

1.2 Vérification et validation selon la littérature scientifique

Cette section recense la littérature scientifique en lien avec l'objet de la recherche. Elle débute par la présentation de définitions souvent données aux processus de vérification et de validation dans la littérature, suivie de la documentation trouvée sur ces processus.

1.2.1 Définitions de vérification et de validation dans un contexte général

La vérification et la validation de documents d'ingénierie sont des termes dont les significations et utilisations ne font pas l'unanimité. Selon MacLeod (2007), il y a une certaine divergence observée dans la littérature scientifique à propos de l'utilisation des termes vérification, validation et revue, ce qu'il énonce en ces termes : « *These are not at all clear. There is considerable divergence in the usage of these terms (Verification, Validation, Review)* » (MacLeod, 2007, p. 3). À ceci, s'ajoute le fait qu'il est courant d'observer une

certaine confusion entre la vérification et la validation, et cette confusion est décrite par Dybkaer (2011) en ces termes : « *in informal speech and writing, the terms “verification” and “validation” are often used interchangeably, but in vocabularies for many special languages, various distinct definitions of the concepts are found* » (Dybkaer, 2011, p. 1). Même si plusieurs définitions distinctes de vérification et de validation ont été trouvées dans la littérature, plusieurs auteurs soulignent cette utilisation confuse de la vérification et de la validation de façon parfois directe comme celle de Bahill et Henderson (2005): « *the terms verification and validation are often confused* » (Bahill & Henderson, 2005). Ceci démontre l'importance de s'intéresser aux définitions de vérification et de validation en raison de leurs importances tant au niveau de la discipline qu'au niveau transdisciplinaire comme l'affirme Dybkaer (2011) en ces termes : « *Unfortunately, they do not all agree in individual wording or mutual relations. As the two concepts are of transdisciplinary importance, they merit a closer terminological look* » (Dybkaer, 2011, p. 1).

La vérification est généralement considérée dans la littérature scientifique comme un processus de contrôle qualité. Maropoulos et Ceglarek (2010b), stipulent que la vérification est un processus de contrôle qualité utilisé pour évaluer si le produit ou le service satisfait aux lois, aux exigences ou aux conditions imposées lors de l'initiation du projet. Pour une définition proche du contexte numérique associé aux maquettes numériques, Hartley et Starr (2010) affirment que la vérification est un processus qui permet de déterminer si le modèle représente le concept prévu et les spécifications ou le cahier des charges. Alors que Gomez, Bedolla, Ricci, et Chiabert (2014) énoncent, que la vérification peut se résumer par la question : est-ce que le produit ou le service a bien été exécuté ? Et d'ajouter que le processus de vérification sert à s'assurer que les exigences, les normes et directives ont été bien appliquées ou exécutées (Hartley & Starr, 2010). Toutes ces définitions et les explications qu'on peut retrouver dans la littérature se résument au fait que le processus de vérification vise à démontrer si les spécifications, les exigences ou les conditions d'initialisation du projet ont été bien implémentées dans la conception (Gomez et al., 2014).

La validation est généralement considérée comme un processus d'assurance qualité qui permet d'obtenir une plus grande qualité des services ou produits. Selon Maropoulos et Ceglarek (2010b), « Validation, on the other hand, is a quality assurance process of establishing evidence that provides a high degree of assurance that a product, service, or system accomplishes its intended use requirements » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b). La validation est la recherche de preuves qui démontrent que le produit ou le service satisfait les besoins pour une utilisation spécifique ou que le produit ou le service répond aux exigences des utilisateurs finaux (Gomez et al., 2014). Il s'agit selon Gomez et al. (2014), de se poser la question : est-ce qu'on a le bon produit ? Pour Acampa, Marino, et Ticali (2019), la validation est aussi la recherche de preuves qui démontrent le respect de l'ensemble de critères ou de contraintes. Tandis que Hartley et Starr (2010) donnent une définition de la validation en tenant compte du contexte numérique, car ils la définissent comme le degré avec lequel le modèle reflète la réalité et précise que la validation est aussi appliquée aux données. Le modèle numérique peut aussi avoir pour objectif de représenter la réalité future qui comblera le besoin du client. Dans ce cas, la validation de modèles numériques peut fournir la preuve que cet objectif est atteint ou non.

1.2.2 Généralités sur les processus de vérification et de validation en Construction

Dans le secteur industriel, avant la mise sur le marché d'un produit, un prototype peut être construit dans le but de subir diverses vérifications et validation, incluant parfois des tests destructifs. En construction, ces pratiques ne sont pas envisageables selon Donato, Lo Turco, et Bocconcino (2018) qui affirment que :

“In an industrial process, it is necessary to perform checks, tests and measurements necessary to eliminate or correct those products that do not meet the requirements set out in the specifications before the final delivery of a product [...]. This is not possible in the construction industry because each variant or error in the construction phase entails a considerable cost. For that reason, it is possible to predict, in advance, the behaviour of the buildings realizing a virtual prototype, and to perform an early evaluation of design alternatives using analysis/simulation tools that increase the overall quality of the

building through BIM (Eastman et al., 2011). Quality can be also defined as the compliance with construction codes and specifications, and is required to a phase of validation often connected with a phase of control or inspection [...]. In spite of the massive widespread adoption of BIM, few research studies have been conducted that refer to the BIM quality control and efficient information utilization [...]” (Donato et al., 2018).

Les processus de vérification et de validation de modèle numérique en ingénierie impliquent l'utilisation de logiciels adéquats parfois dotés d'outils d'analyse de données. Dans le “McGraw-Hill (2012)”, le Professeur Charles Eastman fait ce constat : «There are two big needs. One is model checking to validate the information in a model that we're relying on for estimation, scheduling and other critical functions» (McGraw-Hill, 2012). Le besoin résulte de l'engouement de certains acteurs de l'industrie de la construction pour le BIM qui est décrit par Jacobsson et Merschbrock (2018), en ces termes : « *BIM is now one of the most common ways to approach the design and construction of large buildings* » (Jacobsson & Merschbrock, 2018, p. 2(990)). Ceci représente un changement pour la plupart des professionnels de l'industrie et les ingénieurs en particulier, car le processus de vérification et de validation de modèle dans un contexte BIM implique l'utilisation d'outils informatiques. La plupart des fournisseurs de logiciels BIM offrent des solutions complètes pour la conception, la modélisation, la vérification et la validation de modèle numérique BIM comme le confirme Sacks, Eastman, Lee, et Teicholz (2018), en ces termes : « *An emerging group of BIM software tools is called model checkers. From the owner or construction manager's perspectives, these tools perform a variety of important functions: Check against program requirements. Validate building information models* » (Sacks et al., 2018).

Les outils utilisés pour le processus de la vérification et de la validation dans le contexte BIM sont fortement influencés par le secteur commercial. Même si l'utilisateur peut paramétrer des

règles de vérification et de validation, l'interaction sur l'algorithme² du logiciel utilisé reste inaccessible. Selon Dimiyadi, Solihin, et Hjelseth (2016), « *BIM-based model checking (BMC)*³ consists of two related parts: an information source (BIM) and algorithms for processing this information (rules). A result of this split is that specification of rules can be traded as a commercial service » (Dimiyadi et al., 2016). Donc, même si l'ingénieur peut faire inclure certains paramètres ou ajouter des critères de vérification et de validation au logiciel BIM, il n'a toutefois aucune maîtrise sur la modification de l'algorithme du logiciel qui reste commercial.

Le manque de termes communs pour désigner le processus de vérification et de validation dans le contexte BIM est un problème pour les recherches dans ce domaine. Cette situation est décrite par Dimiyadi et al. (2016), en ces termes: « *The lack of joint use of terms for BMC makes it very hard to assess the contribution of an article without reading it from start to finish to discover what 'type' of checking was involved, and what the benefit was for the users* » (Dimiyadi et al., 2016). Selon Dimiyadi et al. (2016), plusieurs termes sont retrouvés dans la littérature pour désigner soit le processus de vérification de modèles 3D, soit celui de la validation de modèles 3D ou parfois la vérification et la validation de modèles 3D. Ces termes sont : « *Compliance checking, code compliance checking, clash detection, rule checking, Model checking, Validation checking, BIM-checking, Quality checking and many more* » (Dimiyadi et al., 2016, p. 2).

² Algorithme : « Ensemble de règles opératoires propres à un calcul ou à un traitement informatique, définies en vue d'obtenir un résultat déterminé » (Office québécois de la langue française, 2023).

³ "BMC is software which processes the content of information in BIM-files according to rules specified as predefined procedures"(Hjelseth, 2015).

1.2.3 Le BIM "model checking"

Le "model checking" peut être décrit comme un ensemble d'activités de contrôle appliqué à un modèle BIM. Selon (Hjelseth, 2015) « *Model checking explores the content of information in BIM-files in a transparent way* » (Hjelseth, 2015) . Il est exécuté en trois phases souvent nommées respectivement par la "BIM validation", le "clash detection" et "code checking" que Acampa et al. (2019) décrivent en ces termes: « *the Building Information Model undergoes different validation process. These include the set of control rules, called rules sets, which are applied to the model in three phases of consequential verification: the BIM validation, to control the attributes and procedures of the modelling procedure, Clash detection, to verify interferences, and Code Checking, to verify compliance with the reference normes* » (Acampa et al., 2019, p. 5). Cependant, la façon dont les trois phases du "model checking" (le "BIM validation", le "clash detection" et le "Code checking") doivent être appliquées n'est pas définie et l'ordre dans lequel ils doivent se dérouler n'est pas spécifié à l'exception du BIM validation qui est toujours exécuté en premier.

Le contenu d'un modèle BIM est généralement assez complexe et assez diversifié, ce qui peut rendre les activités de "model checking" assez difficiles à exécuter dans un contexte BIM. Selon Acampa et al. (2019), le "model checking" permet de procéder à l'analyse et à la validation de données de types diversifiés : « *Model checking phase, thanks to neutral IFC interchange format, geometric and non-geometric parameters implemented in information models are analyzed and validated* » (Acampa et al., 2019, p. 5).

Le "model checking" est un processus réglementé par la série 19650 de la norme ISO et est appliquée dans certains pays tels que l'Italie. Selon Andrich, Daniotti, Pavan, et Mirarchi (2022),

« *Model Checking is divided into three main consequential check phases: BIM validation, which aims to ascertain the quality level and internal consistency of the model in order to ensure the extraction of reliable results in subsequent analysis; clash detection, namely the control of physical interference*

(collisions) between elements; code checking, namely the check of compliance of the model to the reference normes. In Italy, Model checking is regulated by UNI 11337-5:2017 (national annex of the ISO 19650 series) through the coordination levels and verification levels » (Andrich et al., 2022).

Les informations trouvées sur ces trois phases du *model checking*, à savoir le *BIM validation*, le *clash detection* et le *code checking* sont énoncées en détail dans les lignes qui suivent.

Le "BIM validation" est la première phase du "*model checking*". Selon Ciribini, Mastrolembo Ventura, et Bolpagni (2016), c'est une étape préliminaire de validation de contenu de modèle qui vient avant d'autres étapes de validation avancée : « *Before moving on to advanced analyses, a pre-check of the model informative content is required through a rule-set, in order to validate its accuracy: this is called BIM Validation phase* » (Ciribini et al., 2016). La validation de modèles BIM doit être complétée avant le transfert de livrables de conception pour les deux autres activités de validation afin d'assurer un haut niveau de qualité du modèle BIM : « *In order to guarantee reliable results, an initial pre-check should be carried out, the so called BIM Validation. This validates the data content of the Information Model and subsequently carries out analyses such as Clash Detection and Code Checking* » (Ciribini et al., 2016). Cette première phase du *Model Checking* appelé *BIM validation* permet de passer en revue l'intégrité de données contenues dans le modèle, de s'assurer que le modèle est complet et qu'il répond aux spécifications et exigences prévues: « *the phase of BIM Validation viewed as a support for a proper workflow : it not only allows to analyze the whole set of information associated with a parametric object but also how the entire model matches the specific design requirements* » (Acampa et al., 2019). Sur le plan scientifique, le BIM validation n'est pas encore clairement défini, d'où la mise en garde de Acampa et al. (2019), qui précise ce qui suit : « *BIM Validation process is not defined yet, but it is important to aim at a correct procedure so as to guarantee the quality of design and future management of the project* » (Acampa et al., 2019). Le potentiel de cette phase de "*model checking*" est souvent mis en évidence à travers quelques études limitées aux projets expérimentaux. Le *BIM*

validation précède toutes les autres phases de "*model checking*", et est effectué pour valider l'intégrité du modèle BIM avant sa transmission aux autres disciplines ou pour compléter le modèle fédéré. C'est au terme de cette activité de *BIM validation* que les autres phases du processus (le "*clash detection*" ou le "*code checking*") sont effectuées.

Le "*clash detection*" ou la détection d'interférence est selon Andrich et al. (2022), une validation de modèle BIM qui impliquent au moins deux disciplines, ce qu'il décrit en ces termes : « *It is the task of the modelers (MOD) to check everything that can be controlled within a single disciplinary model. Therefore, a check that requires the combination of two or more disciplinary models (e.g., clash detection checks involving several disciplines) is not the responsibility of the modelers* » (Andrich et al., 2022). Il est utilisé pour premièrement identifier les interférences possibles entre les différents éléments de son modèle et des cas de conflits dans un espace entre les éléments de diverses disciplines qui occupent cet espace : « *the designer must detect any interference for the part of its competence in the same platform of BIM Authoring and then for the next phase of multidisciplinary coordination there are several validation software such as BIM Viewer* » (Acampa et al., 2019, p. 6). Dimiyadi et al. (2016) donne un exemple spécifique du "*clash detection*": « *in an oil platform the pipes may have priority and the structural solution must adapt. This example also illustrates the relation between saying what is wrong and what must be done to correct* » (Dimiyadi et al., 2016). Le "*clash detection*" selon Arayici, Egbu, et Coates (2012), est un processus de coordination : « *Clash detection has the ability to assist in interdisciplinary coordination issues* » (Arayici et al., 2012). Le *clash detection*, évidemment, peut précéder le *BIM validation*, mais le *code checking* est une phase du processus dont on ne peut pas a priori se prononcer sur l'ordre dans lequel il faut l'effectuer. La Figure-A XIV-1 présente un exemple d'application de "*Clash detection*".

Le "*code checking*" est la phase de "*model checking*" qui permet de s'assurer que les bonnes normes et codes de construction sont appliqués au modèle, qu'il n'y a pas eu d'omissions ou d'erreurs. Selon Acampa et al. (2019), « *The phase of Code Checking is able to validate the*

*project by comparing the parameters contained in the model with the normes and regulations of reference » (Acampa et al., 2019, p. 7). Comme le précise Ciribini et al. (2016), le modèle BIM peut être validé s'il satisfait aux exigences de codes et normes. Les normes et exigences peuvent être représentés en langages informatiques codés et ainsi, des règles peuvent être programmées afin de s'assurer de l'adéquation entre les exigences requises et la conception: « Code Checking is a declination of Model Checking by means of which the design may be validated by comparing the parameters included in the model with reference regulations and codes. The construction process is regulated by several rules at a local, national and international level, and the relevant information included in such documents can be translated into parametric rules through the support of a semantic reading and interpretation system » (Ciribini et al., 2016). Il existe plusieurs logiciels utilisés pour le *code checking* tels que *Solibri Model Checker (SMC)*, *Autodesk Model Checker for Revit*, *autodesk navisworks* pour la coordination dans un contexte BIM.*

1.3 Vérification et Validation selon les normes de l'industrie

Cette section donne les définitions de termes de vérification, de validation et de la revue en ingénierie souvent considérée comme une forme d'activités de contrôle dans un processus multidisciplinaire. Elle présente les recommandations des normes en lien avec les processus de Vérification et de Validation, et de la norme ISO/IEC/IEEE 24765:2017 qui définit les termes et vocabulaires communs utilisés dans les domaines de l'ingénierie de logiciel et de système.

1.3.1 Définitions de vérification et de validation selon la norme ISO 9001:2015

La norme ISO 9000 définit la vérification comme étant la « confirmation par des preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites » (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a (3.8.12)) et la validation comme étant la « confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévues ont été satisfaites » (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a (3.8.13)). Selon les notes 1 de chacun des deux articles 3.8.12 et 3.8.13, la preuve objective pour le processus

de la vérification ou de la validation est apportée par les mêmes moyens: les preuves objectives requises pour la vérification et pour la validation peuvent être le résultat d'un contrôle ou d'autres formes de détermination, telles que la réalisation de calculs ou la revue de documents.

La norme ISO 9001:2015 donne les lignes directrices génériques à suivre pour la planification de la conception et les considérations à prendre en compte pour implanter les processus de vérification et de validation au sein de l'organisation. Les articles 8.3.2 à 8.3.6 d'ISO 9001:2015 permettent d'assurer la qualité des éléments d'entrée et de sortie de la conception. L'article 8.3.4 intitulé « Maîtrise de la conception et du développement » donne de brèves recommandations sur l'implémentation de la vérification et de la validation en ces termes :

« L'organisme doit maîtriser le processus de conception et de développement pour assurer que:

- a) des revues sont menées pour évaluer l'aptitude des résultats de la conception et du développement à satisfaire aux exigences ;
- b) des activités de vérification sont réalisées pour s'assurer que les éléments de sortie de la conception et du développement satisfont aux exigences d'entrée ;
- c) des activités de validation sont réalisées pour s'assurer que les produits et services résultants satisfont aux exigences pour l'application spécifiée ou l'usage prévu ;
- d) toutes les actions nécessaires sont entreprises pour les problèmes déterminés lors des revues ou des activités de vérification et de validation » (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015b art. 8.3.4).

1.3.2 Revue de documents d'ingénierie selon l'ISO 9001:2015

Le chapitre 8 de la norme ISO 9001:2015 décrit les activités du cycle de conception dont il faut tenir compte lors de la conception des processus dans l'organisation. Ces activités incluent les exigences à respecter lors du déroulement des processus de vérification et de validation. La norme ISO 9000:2015 définit la conception et développement (C&D) comme un "ensemble de processus qui transforme des exigences relatives à un objet en exigences détaillées permettant de le réaliser" (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a(3.4.8)). Selon l'article 8.3.1 de la norme ISO 9000:2015, "L'organisme doit établir, mettre en œuvre et tenir à jour un processus de C&D approprié pour assurer la fourniture ultérieure de produits

et services” (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a (8.3.1)). Les différentes activités de C&D que l’organisation doit planifier concernent aussi la mise en place de revues de C&D à réaliser tout au long du projet (voir art. 8.3.4), la réalisation de la vérification de la C&D (voir art. 8.3.4), la réalisation de la validation de la C&D (voir art. 8.3.4) (Jean-Claude Guédeu, 2015, p. 30). La norme ISO 9001:2015 ajoute la note que « les revues, la vérification et la validation de la conception et du développement ont des objectifs distincts. Elles peuvent être réalisées séparément, ou être combinées, de façon adaptée aux produits et aux services de l’organisme » (ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015b). La norme ISO 9001 fait référence à la norme IEC61160 (IEC - International Electrotechnical Commission, 2005) revue de la conception pour le management de la qualité. La norme IEC61160 donne les définitions et recommandations nécessaires pour effectuer la revue de documents d’ingénierie. Selon la norme ISO 9000:2015 art. 3.11.2, la Revue est la « détermination de la pertinence, de l’adéquation ou de l’efficacité d’un objet à atteindre des objectifs définis ». Et selon l’article 3.11.1 de la même norme, la détermination est une « activité consistant à déterminer une ou plusieurs caractéristiques (3.10.1) et leurs valeurs caractéristiques ». La caractéristique étant définie à l’article 3.10.1 comme un « trait distinctif » et la note 3 de cet article ajoute qu’« il existe différents types de caractéristiques, tels que : a) physiques (par exemple mécanique, électrique, chimique, biologique) ; b) sensorielles (par exemple odeur, toucher, goût, aspect visuel, sonorité) ; c) comportementales (par exemple courtoisie, honnêteté, véracité) ; d) temporelles (par exemple ponctualité, fiabilité, disponibilité) ; e) ergonomiques (par exemple caractéristique physiologique ou relative à la sécurité des personnes) ; f) fonctionnelles (par exemple vitesse maximale d’un avion) ». Pour la norme IEC61160, « une revue de conception est une activité de conseil. Elle est prévue en premier lieu pour apporter une vérification du travail de l’équipe de développement et fournir des recommandations quand cela est possible pour améliorer le produit ou le procédé et sa réalisation. Il convient donc de considérer la revue de conception comme une procédure d’affinement et non comme une procédure créative » (IEC - International Electrotechnical Commission, 2005).

1.3.3 Processus de validation BIM selon l'ISO 19650-2:2018

La validation de modèle BIM s'inscrit dans la gestion de l'information traitée par l'ISO 19650-2:2018 en complément avec d'autres normes telles que la série de l'ISO 9000, traitée précédemment dans ce chapitre. Dans sa partie introductive, l'ISO 19650-2:2018(F) précise qu'elle est conçue pour permettre à une "partie désignante"⁴ d'établir ses exigences d'information au cours de la phase de réalisation des actifs et de fournir l'environnement collaboratif adapté dans lequel les (multiples) "parties désignées"⁵ peuvent produire de l'information de manière efficiente et efficace. La norme ISO 19650-2:2018 s'applique aux ouvrages de construction de toutes tailles et de tous niveaux de complexité. Toutefois, cette norme doit être adaptée au besoin de l'utilisateur. Cette norme s'adresse aux parties impliquées dans la gestion ou la production d'informations pendant la phase de réalisation d'actifs, aux parties impliquées dans la conception.

L'ISO 19650-2:2018 propose un processus de gestion de l'information pendant la phase de réalisation des actifs dont la cartographie peut être consultée à ANNEXE III , et ANNEXE IV . Avant de produire de l'information, chaque équipe de travail doit vérifier qu'elle a accès à de l'information de référence pertinente et aux ressources partagées dans la *common data environment* (CDE) ou environnement commun de données du projet, sinon, il faut en informer la partie désignée principale (Coordinateur BIM). Chaque équipe doit effectuer le contrôle qualité de chaque conteneur d'information (modèle géométrique 2D/3D, documents, etc.) produit conformément aux méthodes et modes opératoires du projet pour la production d'information. Ce n'est qu'après cette activité qu'elle doit procéder à la revue de l'information

⁴ Partie désignante : personne responsable de la fonction de gestion et des conditions d'exigences de l'information du projet.

⁵ Parties désignées : Équipes de travail dans leurs domaines respectifs.

que contient le conteneur contrôlé. L'équipe doit produire à terme, le rapport qui montre l'état de succès ou de l'échec et le rejet le cas échéant du conteneur d'information et ceci, accompagné des indications sur les actions correctrices.

1.3.4 Revue selon la norme ISO 19650-2:2018

Chaque équipe doit revoir et approuver le partage de l'information. Elle doit effectuer la revue de l'information dans son conteneur en tenant compte des exigences d'information fournie, du niveau de besoin d'information et des informations exigées pour la coordination avec les autres groupes de travail. Une fois la revue effectuée, il faut produire un rapport qui indique si la revue a été effectuée avec succès ou non. Dans la première situation, il faut approuver le partage d'information et attribuer le code correspondant. Dans la seconde situation, il faut enregistrer la raison de l'échec, enregistrer toute modification à effectuer par l'équipe de travail et rejeter le conteneur d'information.

1.4 Vérification et Validation selon les organismes de réglementation du génie

Cette section présente les recommandations des organismes de réglementation du génie sur la vérification et la validation en ingénierie. Un accent particulier est mis sur le guide de pratiques professionnelles de l'OIQ pour deux raisons : parce que l'étude concerne particulièrement la pratique dans le contexte québécois et parce que le guide de l'OIQ paraît comme le plus complet. Chaque terme nouveau abordé est défini avant d'être décrit en détail lorsque requis, et ceci, en début de paragraphe.

1.4.1 Définition des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Les documents d'ingénierie dans le cadre de cette recherche concernent les livrables de conception émis pour construction en génie civil. Le Tableau 1.1 montre quelques définitions proposées par quelques organismes de réglementation du génie.

Tableau 1.1 Définitions de documents d'ingénierie

Organisme	Définitions de documents d'ingénierie
OIQ	Un document d'ingénierie désigne tout document produit par l'ingénieur dans le cadre de l'exercice de l'ingénierie.
Engineers Geoscientists Manitoba	A work product that expresses engineering work, typically as a result of an analysis or design process, e.g. engineering drawings; specifications and design requirements; instructions; design notes and calculations; reports based on engineering judgment, opinions, evaluations, certifications, condition assessments, analysis or verifications
Engineers and Geoscientists British Columbia	Includes any physical or electronic Record, including but not limited to a report, certificate, memo, specification, drawing, map, or plan, that conveys a design, direction, estimate, calculation, opinion, interpretation, observation, model, or simulation that relates to the Regulated Practice.

Ces Documents sont généralement constitués de plans et devis. Un plan est la traduction de la conception de l'ingénieur en langage graphique et un devis contient généralement la traduction des exigences en une description qualitative détaillée des matériaux, équipements, systèmes, spécifications techniques dans le cadre de travaux à réaliser (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 598).

1.4.2 Contexte de travail de l'ingénieur au Québec

Au Québec, les ingénieurs ont l'obligation de se soumettre aux exigences de l'OIQ dans le cadre de l'exercice de leur profession. La vérification et la validation des documents de projet incluant les documents d'ingénierie fait partie des exigences de l'OIQ, car « Les éléments livrables constituent les résultats factuels du projet. À ce titre, ils sont soumis à la procédure de validation » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 28). L'OIQ recommande de

« Préciser les délais et les niveaux d’approbation nécessaires pour la validation de documents de projets en général. Si nécessaire, il faut distinguer les phases du cycle de vie d’un livrable : relecture, émission de remarques, correction, validation » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 142).

La présente recherche s’intéresse particulièrement aux documents d’ingénierie livrés à la phase de réalisation ou de construction. La conception dont découlent les documents d’ingénierie contient plusieurs phases et le passage d’une phase à une autre est conditionné par des jalons, des points de validation et de confirmation où les acteurs principaux du projet doivent s’exprimer et prendre des décisions permettant d’aller de l’avant avec la conception, ou pas. « Après que la ventilation des itérations dans le temps a été faite, il est primordial de statuer sur les principaux jalons du projet. Ces derniers représentent des livrables précis, habituellement liés à une décision de poursuite ou d’arrêt (go/no-go, décision) du projet. Des périodes de validation, pour évaluer les jalons essentiels du projet, doivent être instaurées » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, pp. 216-217).

Le cycle de vie de projet de construction aide à avoir un aperçu de ces jalons et le type de livrable requis. Celui proposé par l’OIQ contient quatre phases : le concept, le développement, l’implantation et la terminaison. Ce cycle de vie de projet en construction est illustré ci-dessous sur la Figure 1.1. À l’étape de l’implantation, qui est souvent nommée comme la phase 3, les documents d’ingénierie produits sont fournis pour construction. À cette étape, la conception est assez avancée, les dessins et spécifications mentionnés sur la figure doivent inclure tous les paramètres du projet, car la prise de responsabilité professionnelle présente plusieurs enjeux à ce niveau. Les ingénieurs doivent accorder une grande attention aux détails de conception à cette phase, car les dessins ou plans émis vont devoir porter la mention « émis pour construction ». Des erreurs de conception à ce stade auront potentiellement de graves conséquences : « À ce stade, le niveau de détail de la conception doit permettre d’illustrer sur les plans tous les éléments de conception nécessaires à la réalisation du projet. L’ingénieur

établit et tient à jour une liste des plans ainsi que du contenu sommaire et de l'historique des versions de chaque élément » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 44).

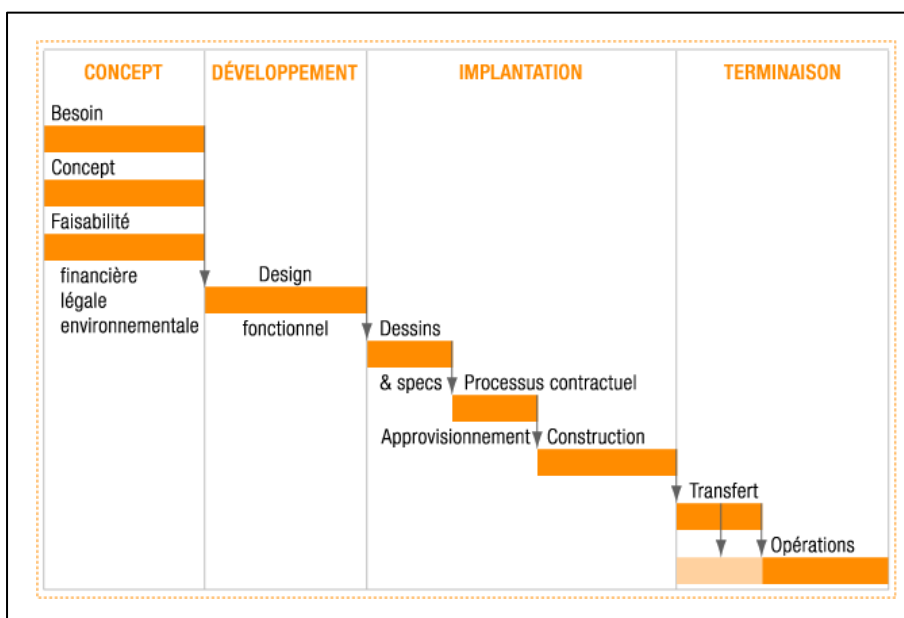


Figure 1.1 Cycle de vie type d'un projet de construction
Tirée de l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b, p. 160)

La construction fait de la phase 3 une phase critique, car « l'ingénieur augmente la précision des détails pour produire la conception détaillée qui mène à la finalité de son travail, notamment la fabrication, la construction, la réalisation ou l'opération » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, pp. 31-32). Une fois les documents d'ingénierie utilisés pour construction, la correction d'erreurs potentielles entraîne inévitablement des conséquences, d'où la nécessité de procéder à des processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie de façon rigoureuse. Ces processus à cette étape impliquent des enjeux sur plusieurs plans pour l'ingénieur qui doit engager sa responsabilité professionnelle, car comme le précise l'OIQ, « Les éléments livrables constituent les résultats factuels du projet. À ce titre,

ils sont soumis à la procédure de validation décrite précédemment » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 149). Particulièrement au Québec, l'ingénieur doit signer et le cas échéant sceller les documents d'ingénierie émis pour construction à défaut de quoi il s'expose à plusieurs sanctions, car « l'OIQ peut tenter des poursuites pénales » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 505).

1.4.3 La vérification de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Selon l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021a), «*Checking is a Quality Control process to confirm that the underlying work is complete, meets all Input Requirements, and is suitable for its intended use or purpose*»(EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021a). Ainsi, selon EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021a), les activités de vérification permettent à l'ingénieur en règle de confirmer que ses travaux qu'il prépare satisfont aux exigences, aux normes de pratiques, de conduite et de compétences attendues pour des travaux similaires, car la vérification est comparable à un second œil sur les travaux de l'ingénieur.

L'OIQ émet des recommandations à propos du type de processus de vérification de documents d'ingénierie comparativement au processus de validation énoncé dans la section suivante. Plusieurs situations peuvent justifier la vérification de documents d'ingénierie. Il s'agit des situations où l'ingénieur veut : «Vérifier certains éléments de la conception ou du travail d'un autre ingénieur ; Vérifier toute la conception ou tout le travail d'un autre ingénieur ; Vérifier que la conception ou le travail d'un ingénieur n'a pas de conséquences sur les travaux temporaires, les travaux permanents ou les installations et équipements existants ou à venir ; Vérifier que la conception ne pose pas de danger pour les travailleurs, le public ou l'environnement ; Vérifier la conformité des travaux ou des documents d'ingénierie ; vérifier la conformité des travaux ou des documents d'ingénierie par rapport à un document d'appel d'offres, à un contrat de services professionnels ou aux besoins du client ou de l'employeur » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b).

Les différents types de vérification recommandée par l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b) sont :

- la vérification avant l'authentification d'un document par son auteur : C'est une vérification qui s'inscrit généralement dans le processus d'assurance qualité de l'entreprise et qui demande une étroite collaboration entre les ingénieurs. Les notes de vérification peuvent être consignées sur les documents d'ingénierie ou dans un document distinct. Les notes doivent être authentifiées. L'ingénieur qui effectue ce type de vérification n'est pas considéré comme l'auteur de document d'ingénierie;
- la vérification après l'authentification d'un document par son auteur : Ce type de vérification est demandé par le client et vise à obtenir une plus grande qualité des documents d'ingénierie vérifiés. L'ingénieur qui effectue ce type de vérification devrait produire un avis authentifié distinct de documents vérifiés;
- la vérification de la conformité d'un document d'ingénierie : Ce type de vérification vise à établir la conformité avec les exigences du client, les exigences contractuelles, les exigences légales ou les exigences par rapport à un appel d'offres. L'ingénieur qui procède à ce type de vérification peut produire son avis directement sur les documents d'ingénierie vérifiés.

Dans tous les cas, les trois types de vérification concernent la vérification du travail d'un confrère et, par conséquent, l'ingénieur qui effectue la vérification n'est en aucun cas considéré comme étant l'auteur de documents d'ingénierie comme l'affirme l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b).

1.4.4 La validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Selon l'APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020), « Validation is the process through which a Responsible Member demonstrates that a professional work product (PWP) meets the quality control and assurance measures described in a permit holder's Professional Practice Management Plan. Validation is required if the PWP

is produced by a licensed professional employed by, or working under contract of, an APEGA permit holder» (APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta, 2020). La validation est donc un processus de contrôle qualité inscrit dans le plan de gestion de la qualité de l'ingénieur en règle ou de son entreprise. L'assurance qualité est « *a set of activities intended to establish confidence that requirements will be met*» (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021a).

Selon l'OIQ, « la validation des livrables » est de la responsabilité du comité utilisateur (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, pp. 140, 142). C'est à l'organisation de l'ingénieur de concevoir un processus conforme aux recommandations de l'OIQ et selon les exigences de diverses normes de management de la qualité (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b). Cependant au cours de la conception, l'ingénieur doit procéder à la validation : « lorsque des hypothèses sont posées, l'ingénieur doit prévoir une procédure ou une méthode pour les valider, une fois le processus d'analyse réalisé. S'il y a lieu, la validation des hypothèses de conception inclura la participation du client. L'ingénieur valide ses hypothèses » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 23). Les méthodes ou les processus de validation doivent être documentés, car ceci permet d'éviter de confondre, par exemple, un calcul fait à des fins de validation pour une donnée viable de la conception (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 23).

1.4.5 L'authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Une fois les documents d'ingénierie vérifiés et validés, ils doivent être authentifiés avant leur transmission à l'extérieur de l'organisation ou pour exploitation (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, pp. 606-607). L'authentification d'un document d'ingénierie se fait par son auteur original et vise à rendre le document officiel. Au Canada, chaque organisme de régulation de la profession d'ingénieur émet ses propres recommandations à propos de l'authentification des documents d'ingénierie.

Selon l’OIQ, l’authentification d’un document d’ingénierie est l’«application des marques de l’ingénieur à un document papier ou technologique afin de l’officialiser par rapport à une finalité donnée» (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 598). L’ingénieur procède à l’authentification de documents d’ingénierie en apposant sa signature et, le cas échéant, son sceau d’ingénieur sur la page de garde de l’original et de chaque copie des documents d’ingénierie qu’il a produit lui-même ou qui a été produit sous sa direction et supervision immédiate (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b). L’authentification a une double importance : en plus de rendre officiels les documents authentifiés, elle identifie l’auteur de documents d’ingénierie et certifie que les documents produits sont complets et sans ambiguïté (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b). L’OIQ donne la démarche à suivre pour l’authentification des documents d’ingénierie dans le guide de pratique professionnelle. Le guide précise quand et comment faire l’usage du sceau d’ingénieur. Le sceau, la signature manuscrite ou la signature numérique constituent les différentes marques distinctives de l’ingénieur dont l’utilisation est présentée dans le Tableau 1.2. Ils attestent que leur titulaire est membre de l’Ordre et qu’il est, de ce fait, autorisé à exercer la profession d’ingénieur au Québec.

Tableau 1.2 Authentification de documents d’ingénierie
Tiré de l’OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b, pp. 604-606)

Type de documents d’ingénierie	Marques distinctives requises pour l’authentification, apposition :	
	Sur un support technologique	Sur un support papier
Plans et devis, addenda, avis de changement, plans finaux, dessins d’atelier, attestations ou certificats de conformité et autres avis dont le sceau est exigé par une loi ou un règlement.	De la signature numérique, incluant, si possible, l’image numérique de l’empreinte du sceau signé, de la date d’authentification.	Du sceau. De la signature manuscrite. De la date d’authentification.

Tout autre document d'ingénierie.	De la signature numérique, incluant, si possible, le nom complet, l'image de la signature manuscrite, le titre professionnel, le numéro de membre, de la date d'authentification.	Du nom complet, de la signature manuscrite, du titre professionnel, du numéro de membre, de la date d'authentification.
-----------------------------------	---	---

L'Ordre est le propriétaire exclusif du sceau et de la signature numérique. Comme on peut le remarquer dans le Tableau 1.2, sur les plans et devis, addenda, avis de changement, plans finaux, dessins d'atelier, attestations ou certificats de conformité et autres avis dont le sceau est exigé par une loi ou un règlement, il faut faire l'apposition : du sceau, de la signature et de la date d'authentification selon l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b, pp. 604-606). Il faut cependant éviter d'apposer son sceau sur tout autre document d'ingénierie que ceux cités précédemment.

Chaque document d'ingénierie est produit pour une finalité et, pour éviter toute utilisation autre que celle à laquelle le document est réservé, l'ingénieur doit donc toujours indiquer sur le document d'ingénierie la finalité, car c'est aussi une disposition légale. « Par exemple, lorsque des plans sont préparés “pour permis”, “pour soumission”, “pour construction”, “pour fabrication”, “pour installation”, ou qu'ils portent la mention “plan final”, ils doivent être authentifiés » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 607). L'ingénieur n'est pas autorisé à transmettre un document d'ingénierie non authentifié à l'externe ou au client sauf dans le cas de certains documents technologiques comme un fichier DraWinG(DWG) et, même dans une telle situation, le document doit être acheminé accompagné de notes de mise en garde pertinente (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 621). L'ingénieur qui appose sa signature et, le cas échéant, son sceau engage donc sa responsabilité professionnelle avec tous les enjeux qui en découlent, d'où la nécessité de bien valider sa conception et les documents

d'ingénierie qui en découlent. Les enjeux ne sont pas équivalents à toutes les phases (étapes) d'un projet en construction. À la fin de chaque phase, il y a généralement des opérations de transfert de responsabilités vers une autre équipe de projets.

Selon l'APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020), trois questions doivent déterminer si un document doit être authentifié ou non : «*Does the engineering or geoscience output contain technical information? Is the technical information complete and final for the intended purpose of the output? Will others rely on the technical information related to the output's intended purpose?* » (APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta, 2020) Si les réponses aux trois questions sont oui, une authentification est requise selon l'une des méthodes de la Figure 1.2.

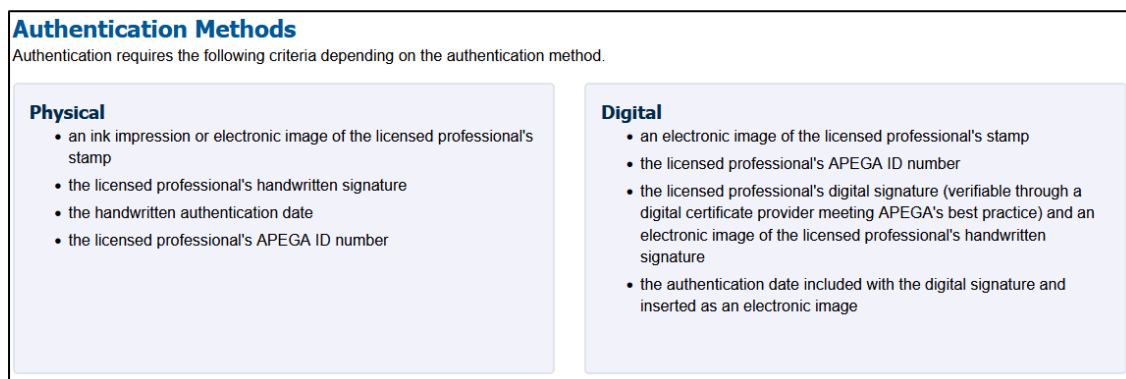


Figure 1.2 Authentification de documents d'ingénierie selon APEGA
Tirée de l'APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020)

Selon l'APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020), l'authentification n'est valide que dans les situations où les travaux ont été effectués par un ingénieur en règle ou sous sa direction et supervision immédiate et que les travaux ont été soigneusement vérifiés par un ingénieur en règle.

Selon l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2022), l'authentification est « *The act of a Professional Registrant Manually Authenticating or Digitally Authenticating a Document* » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2022).

Tableau 1.3 Définitions des termes associés à l'authentification
Tiré de l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2022)

Terms	Definitions
Digitally Authenticating	A Professional Registrant applying all of the following to a Document: (a) the Professional Registrant's Digital Seal. (b) a digital image of the Professional Registrant's signature. (c) a digital image of the date of authentication. (d) the Professional Registrant's Digital Certificate.
Digital Seal	A digital image of a Professional Registrant's Manual Seal with no material variation in format or wording.
Digital Certificate	A certificate issued to a Professional Registrant by a Certificate Authority that attests to the legitimacy of information through the use of encryption.
Manually Authenticating	A Professional Registrant applying all of the following to a Document: (a) the Professional Registrant's Manual Seal. (b) the Professional Registrant's handwritten signature; and (c) the date of authentication.
Manual Seal	The ink stamp or embossing machine issued to a Professional Registrant by Engineers and Geoscientists BC that can create an impression on a Document.

Tout document préparé par un professionnel en règle de l'EGBC dans le cadre de l'exercice de ses fonctions doit être authentifié conformément aux directives du guide intitulé "Authentification of documents". Ce guide de 52 pages donne plusieurs directives sur les types de documents qui requièrent une authentification, les buts de l'authentification, les rôles des auteurs principaux, les méthodes et les façons de procéder à l'authentification. Les autres organismes de réglementation du génie du Canada adoptent à peu près les mêmes

recommandations. L'Engineers Nova Scotia suggère à ses membres un test pour savoir si un document requiert ou non une authentification selon la Figure 1.3.

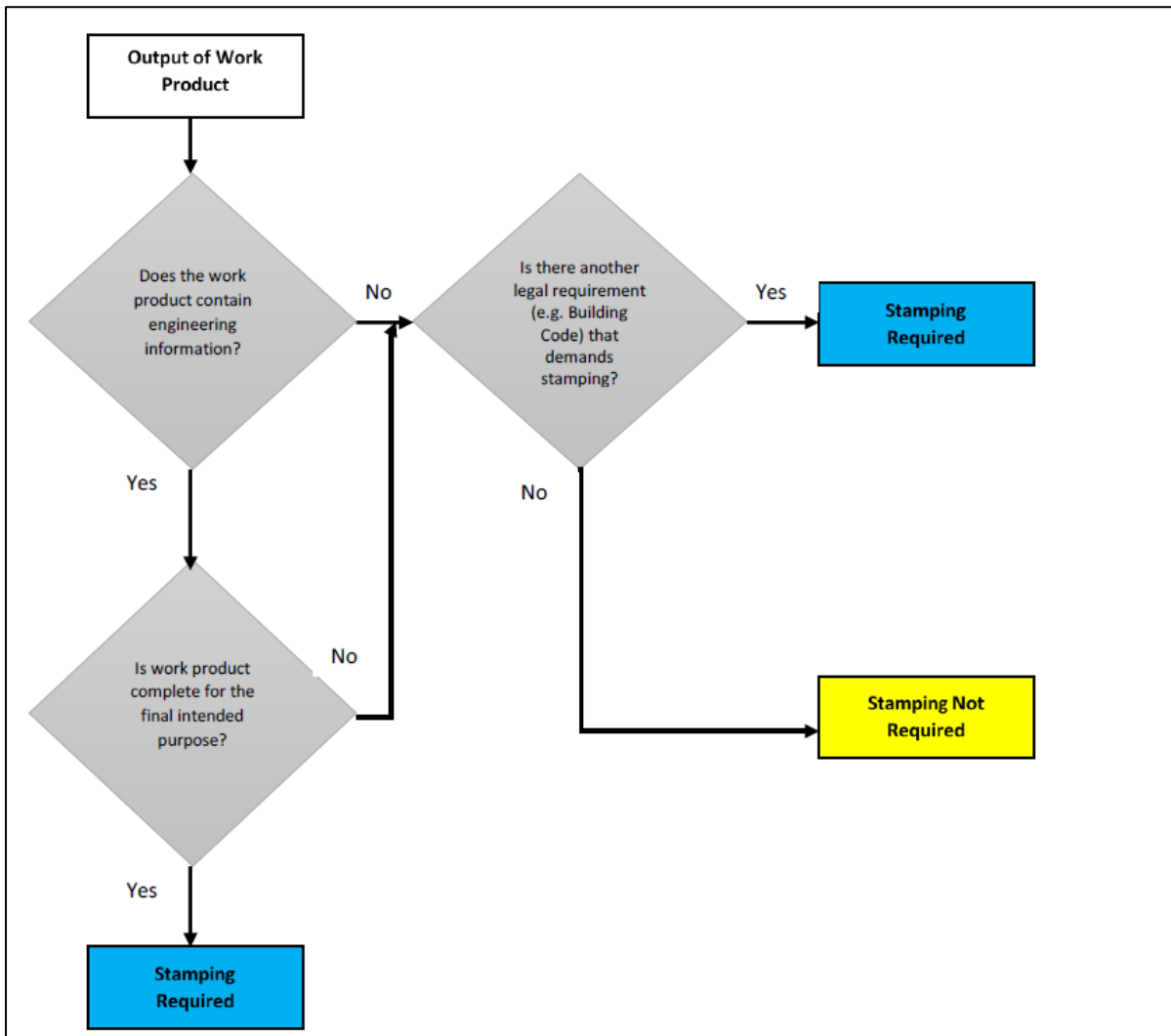


Figure 1.3 Stamping Test according to Engineers Nova Scotia
Tirée de l'ENS - Engineers Nova Scotia (2019, p. 4(6))

1.4.6 Processus de validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Peu de recommandations sont émises à propos de la validation. Elle est souvent désignée dans les guides de pratiques professionnelles comme un processus d'assurance qualité. D'ailleurs, selon APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020), la validation est considérée comme un processus de contrôle qualité et d'assurance qualité.

L'OIQ énonce de grandes lignes de recommandation sur le processus de validation de documents de projet par l'utilisateur ou le destinataire avant utilisation, comme montré sur la Figure 1.4.

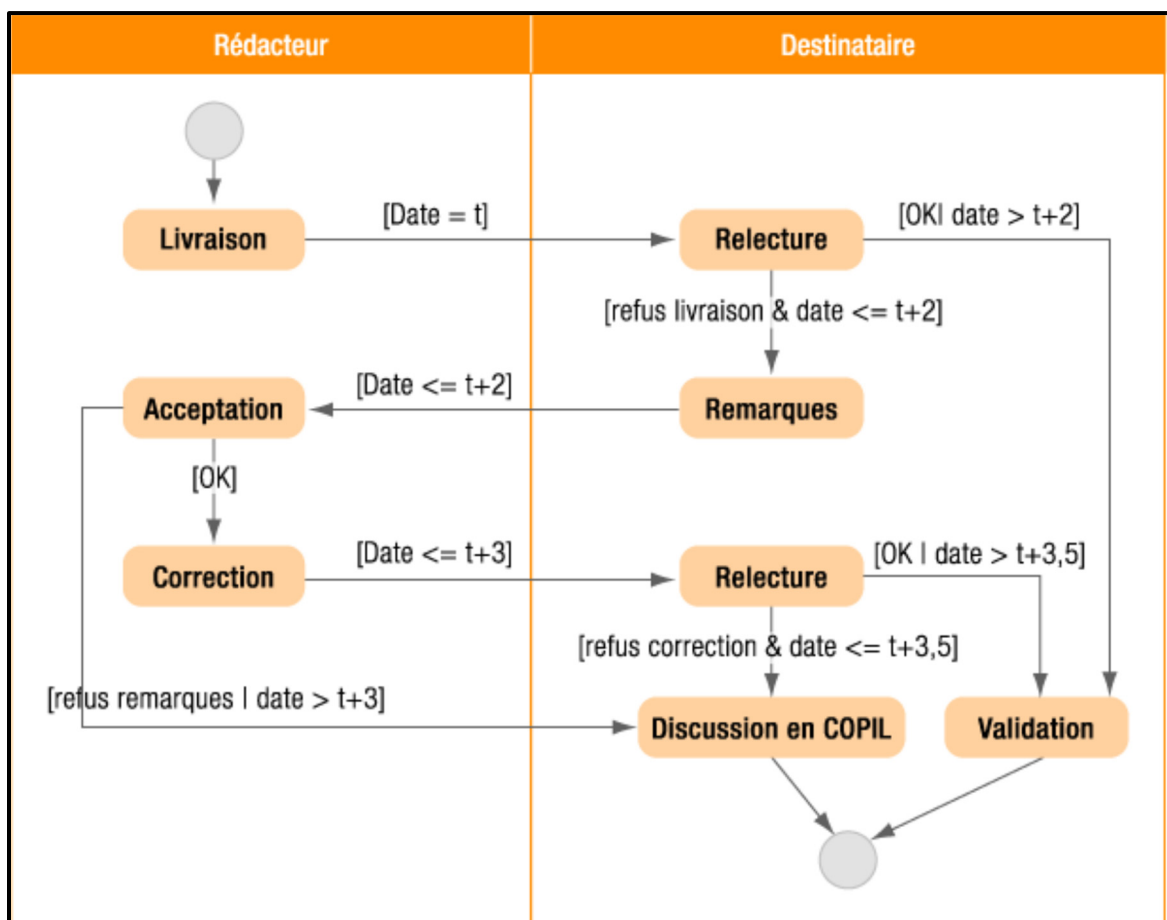


Figure 1.4 Procédure type permettant de limiter les retards de validation

Tirée de l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b, p. 143)

Comme on peut le remarquer sur la Figure 1.4, l'OIQ n'indique pas les façons de faire pour valider le document d'ingénierie ou de projet, car « Les objectifs des mandats de conception qu'ont à atteindre les ingénieurs sont si nombreux et de nature si différente qu'il est impossible de décrire ici les façons d'y parvenir » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 36 (42/878)). Tout comme le recommandent les normes de l'industrie en matière d'élaboration des activités de contrôle dans les entreprises, il revient à l'organisation ou à l'ingénieur de mettre en œuvre des processus qui l'aideront à bien procéder à la validation de documents d'ingénierie. D'après le guide de pratique professionnelle de l'OIQ, « l'ingénieur s'assure de la validité des moyens dont il se sert pour faire ses calculs, par exemple, en procédant à un ou plusieurs calculs manuels ou en se renseignant sur la rigueur et la qualité technique des logiciels utilisés, le cas échéant. Il assume la responsabilité des erreurs qui peuvent en résulter » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 43). Dans tous les cas, l'ingénieur doit fournir « des plans, devis et autres documents qui sont complets, non ambigus et explicites. [...] l'ingénieur ne doit pas, dans ses avis et documents, chercher à cacher une quelconque erreur ou omission, ou ménager d'autres intérêts que ceux de son client ou de son employeur » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, pp. 554-555(560-561/878)). L'OIQ reconnaît qu'un processus peut être initié par l'organisation ou le client dans le but d'assurer une plus grande qualité des livrables : dans un tel cas, on peut aussi parler de revue de la conception.

1.4.7 La revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

La revue de documents d'ingénierie est un processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie effectué par un ingénieur qui n'est pas l'auteur de ces documents dans le but d'obtenir une plus grande qualité de ceux-ci. Toutefois, les recommandations sur les façons de procéder à la revue de documents d'ingénierie, lorsque disponibles, varient d'un organisme à un autre.

L'Engineers and Geoscientists British Columbia définit la revue indépendante de la façon suivante: « *A documented evaluation of the structural design concept, details, and documentation based on a qualitative examination of the substantially complete structural design documents before they are issued for construction or implementation, and the evaluation is performed in accordance with the Bylaws and this Guide by an appropriately qualified and experienced Professional Registrant who was not involved in preparing the design* » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b). L'EGBC recommande deux types de revue de documents d'ingénierie: la revue de type 1 qui peut être effectuée par un ingénieur en règle de la même entreprise que celle de l'auteur des documents d'ingénierie et la revue de type 2 qui doit être effectuée par un ingénieur en règle d'une entreprise autre que celle de l'auteur des documents d'ingénierie.

Selon l'OIQ, la revue de documents d'ingénierie est effectuée généralement lorsque plusieurs domaines sont mis à contribution pour un projet de conception. « L'objectif est de permettre la mise en commun des divers avis sur des éléments particuliers et d'en assurer l'intégration » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 44). Dans un contexte multidisciplinaire, un coordinateur doit être désigné pour gérer l'ensemble des disciplines et, dans une telle situation, la validation de la conception et de documents d'ingénierie prend la forme de la revue de la conception. Selon l'OIQ, un ingénieur est désigné responsable de l'intégration et il doit s'assurer de rendre compte de toutes les anomalies, incompatibilités et redondances provoquées dans les autres disciplines lorsqu'interviennent des changements dans la conception de l'une des disciplines. C'est une opération qui dure plusieurs jours, voire quelques semaines. « Généralement, les changements apportés à la conception sont regroupés dans un document distribué aux ingénieurs concepteurs » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021b, p. 44).

1.5 Synthèse de la revue de la littérature

1.5.1 Synthèse des définitions de la vérification et de la validation

Les activités de validation de modèles, de vérification minimisent les risques qu'il y a à utiliser les modèles et ces activités ont été longtemps considérées comme le moyen d'examiner l'adéquation de la conception aux exigences, aux lois et aux documents techniques. Cependant, la complexité inhérente à l'industrie de la construction rend la vérification et la validation difficiles à appliquer dans le processus de conception. Toutefois, certaines recherches démontrent que la validation automatique de modèles BIM permet de valider 40 à 60% plus d'éléments dans un modèle que les méthodes traditionnelles de validation. Ces résultats justifient l'utilité de l'automatisation des activités de contrôle de modèles et des documents d'ingénierie.

Selon les normes, la vérification est la « confirmation par des preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites » tandis que la validation est la « confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites ».

La vérification est un processus de contrôle qualité utilisé pour évaluer si le produit ou le service satisfait aux lois, aux exigences ou aux conditions imposées lors de l'initiation du projet. En d'autres termes, il s'agit de se poser la question suivante : est-ce que le produit, le système ou le service est correctement exécuté?

La validation est définie dans la littérature comme un processus d'assurance qualité qui permet de démontrer que le produit, le système ou le service répond aux exigences d'utilisabilité. Il s'agit de se poser la question : est-ce qu'on a le bon produit ou service ?

1.5.2 Synthèse des déroulements des processus de vérification et de validation

Les recommandations des normes de l'industrie et des guides de pratiques professionnelles sont génériques et n'ont pas pour objectif de décrire les façons de procéder. Cependant, les

normes donnent des concepts et des directives qui permettraient à l'organisme d'élaborer des activités de contrôle de modèles et de leurs contenus dans un contexte numérique. Par ailleurs, la littérature présente le "*BIM-base model checking*" comme l'activité de contrôle qui permet de vérifier et de valider les modèles dans un contexte BIM. La validation BIM ou la validation de contenu, la détection d'interférence ou "*clash detection*" et le "*code checking*" sont les activités qui permettent de mener les activités de contrôle de modèle BIM. Très peu ou pas de littérature s'intéresse aux processus de vérification et de validation dans un contexte traditionnel.

La revue en ingénierie est un processus de contrôle des activités créatrices de l'ingénieur, exécutées dans un contexte de travail multidisciplinaire. L'objectif est de produire des rapports sur les erreurs, les ambiguïtés et les omissions constatées dans les modèles ou les documents d'ingénierie et de les transmettre aux ingénieurs concepteurs. Ces rapports doivent contenir les indications sur les anomalies constatées et des recommandations sur les actions correctrices à entreprendre. Les recommandations sur le déroulement des revues de documents d'ingénierie dépendent de chaque organisme de réglementation du génie

1.5.3 Synthèse de l'authentification des documents d'ingénierie

Chaque organisme de régulation de la profession d'ingénieur a ses propres recommandations en ce qui concerne le processus d'authentification, de signature et d'application du sceau sur les documents d'ingénierie. Selon l'OIQ, l'authentification est l'application des marques distinctives de l'ingénieur à un document papier ou technologique afin de l'officialiser par rapport à une finalité donnée. La non-authentification d'un document d'ingénierie ne dispense pas son auteur de ses responsabilités professionnelles, au contraire, la transmission d'un document d'ingénierie non authentifié hors de l'organisation ou pour construction est un acte illégal répréhensible par la loi au Québec.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour mener ce projet de recherche. Ainsi, après une brève introduction, on explique en premier lieu le choix de la démarche de recherche exploratoire. Ensuite, le choix de la question de la recherche est expliqué. Puis, la démarche adoptée pour réaliser la collecte de données est présentée en revenant tour à tour sur les bases de données scientifiques, les normes de l'industrie, les plans de cours sur les processus de vérification et de validation en génie civil et les guides de pratique professionnelle. Enfin, la démarche adoptée pour les deux séries d'entrevues considérées est présentée, pour terminer sur les considérations éthiques du projet.

2.1 Introduction

Selon le travail de Falardeau (2020), le processus de validation de documents d'ingénierie semble ambigu pour certains ingénieurs ; pour eux, le périmètre et les limites de la validation ne sont pas toujours clairement définis, et ce qu'il faut faire n'est pas toujours clair. De plus, certains ingénieurs ont indiqué être inconfortables à procéder à la validation à cause de la complexité des contenus des maquettes numériques à valider. C'est la raison principale pour laquelle nous nous intéressons au processus de validation et à l'existence des écrits scientifiques, de procédés ou des façons de faire, qui montreraient comment se déroule le processus de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction. À cause de la confusion observée lors de l'utilisation des termes "vérification" et "validation", les deux termes sont pris en compte dans cette recherche.

2.2 Recherche de type exploratoire

2.2.1 Justification du choix de la méthode de recherche

Vue la complexité du problème décrit précédemment, le fait que le processus de validation semble non clairement défini et que ses contours semblent ambigus selon les conclusions de

Falardeau (2020), nous avons opté pour une méthodologie qui permettrait de couvrir des sources multiples de données pour trouver des réponses aux questions de recherche énoncées en l'introduction. En effet, selon Trudel et Vonarx (2007), la recherche exploratoire peut viser à clarifier un problème qui n'est pas encore clairement défini. Ce choix nous permet d'élargir notre champ de collecte de données et d'avoir comme source d'information la littérature scientifique, les normes de l'industrie de la construction, la littérature professionnelle et les entrevues. La diversité de sources que permet la méthode est un plus pour la compréhension de l'objet de recherche, car cette démarche favorise l'émergence de différentes facettes de l'objet de la recherche (Alexandre, 2013, p. 9).

La validité des résultats dépend évidemment de la rigueur avec laquelle les données sont collectées, en passant par la préparation de la collecte elle-même selon la DFGA - Direction de la formation générale des adultes (2000). Cependant, la recherche est d'abord exploratoire et permet de poser les fondements pour de futures recherches sur les processus de vérification et de validation des documents d'ingénierie : « lorsque nous souhaitons circonscrire un objet de recherche, définir de nouvelles pistes de recherche, choisir des avenues théoriques ou identifier une méthode appropriée à l'objet et à nos objectifs de recherche, nous sommes dans le registre de la recherche exploratoire » (Trudel & Vonarx, 2007).

2.2.2 Validité des résultats de la recherche

La validité interne de cette recherche est assurée en veillant à la pertinence et à la cohérence des résultats obtenus. « La validité interne d'une recherche qualitative suppose, d'une part, des résultats "justes", "authentiques" et "plausibles" par rapport aux(x) terrain(s) d'étude et, d'autre part, des résultats liés à une théorie antérieure ou émergente. Retenons à présent d'une manière globale qu'elle consiste donc à s'assurer de la pertinence et de la cohérence interne des résultats générés par l'étude » (Ayerbe & Missonier, 2007, p. 6(41)). Le choix d'une recherche exploratoire a l'avantage de produire des données de sources diversifiées. La cohérence entre ces données permettra d'assurer la validité interne des résultats obtenus.

2.2.3 Analyse des données

L'analyse des données peut se faire à l'aide de l'une des deux techniques suivantes : les matrices et les diagrammes (graphiques). Dans le cadre de ce projet, il s'agit de concevoir des tableaux rectangulaires qui croisent l'ensemble des variables identifiées selon chaque source des données explorée. Les données seront organisées et analysées par type de source de données de façon à établir l'existence ou non de liens entre les variables afin d'étudier leur influence sur le déroulement des processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie.

2.3 Choix de la question de la recherche

Les recherches sur la vérification et la validation de documents d'ingénierie apparaissent comme un sujet peu abordé dans l'industrie de la construction, bien que le processus en lui-même soit incontournable pour la réussite d'un projet de conception dans l'industrie. Dans les premiers stades de ce projet, la question initiale était: quelle est la démarche mentale que l'ingénieur adopte lorsqu'il fait la validation de documents d'ingénierie ? Comme dans la plupart des situations, « La question de recherche se situe dans une perspective évolutive et il faut la laisser se développer au gré des besoins de l'apprentissage » (Deslauriers, 2019, p. 32). Les résultats préliminaires de la tentative de définir la vérification et la validation de documents d'ingénierie nous ont menés au constat que le sujet n'était peut-être pas défini. Pour mieux cerner le problème afin de l'appréhender dans le cadre d'une étude scientifique, il est judicieux de savoir s'il existe des écrits centrés sur le déroulement du processus de vérification et de validation dans l'industrie de la construction et particulièrement en génie civil. Ainsi, pour guider la recherche, la question principale à laquelle il faut trouver une réponse est : comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil ? Des éléments de réponses peuvent provenir de guides de pratiques professionnelles, des normes de l'industrie, de documents scientifiques et par le biais d'entrevues avec les ingénieurs qui effectuent le processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie. Toute la stratégie de collecte de données mise en place dans cette recherche a pour but de répondre à

cette question et les sous-questions que cette dernière soulève à savoir : Quelle définition la littérature donne-t-elle de la vérification et de la validation ? En quoi consistent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction ? Et en quoi consiste l'authentification de documents d'ingénierie ?

2.4 Démarche adoptée pour la collecte de données







Cette recherche est essentiellement qualitative, car « le terme recherche qualitative désigne ordinairement la recherche qui produit et analyse des données descriptives, telles que les paroles écrites ou dites, et le comportement observable des personnes » (Deslauriers, 2019, p. 6). Il faut noter que tous les auteurs ne s'entendent pas sur les définitions données à la recherche qualitative, mais lui donnent tous le même sens (Deslauriers, 2019, p. 6). Donc, nos données dans cette recherche proviennent de sources diversifiées, soient les deux types de données suivants : les sources primaires et les sources secondaires. Les sources primaires concernent les transcriptions d'entrevues avec les ingénieurs et les professeurs, les guides de pratiques professionnelles et les normes de l'industrie de la construction. Les sources secondaires comprennent les livres issus de la recherche de plan de cours et la sélection d'œuvres de la littérature scientifique.

2.5 Recherche dans les bases de données scientifiques

Nous avons élaboré une démarche qui nous permet d'explorer la littérature scientifique pour tirer de l'information pertinente sur le sujet de la vérification et de la validation en général afin de progresser vers le thème spécifique qui se rapporte à notre question de recherche sur le processus de vérification et de validation de documents dans l'industrie de la construction. « La recherche bibliographique est une première étape permettant l'identification de sujet de recherche tout en commençant à rechercher autour d'une thématique portant sur une problématique générale pour aller vers une problématique plus particulière » (Ben-Daoud, 2016, p. 24). Pour y parvenir, la mise sur pied d'un plan de concepts contenant les termes et expressions devant guider les recherches dans les bases de données s'est avérée nécessaire.

Le plan de concepts du Tableau 2.1 est mis sur pied à partir de termes en rapport avec la vérification et la validation, trouvés dans les documents professionnels, les concepts fondamentaux, les principes et le vocabulaire des systèmes de management de la qualité de normes ISO 9000 et ISO 25000. La norme ISO 25000 est le guide de gestion de qualité, norme où on retrouve le vocabulaire de plusieurs processus en lien avec la conception. À partir de la recherche de documents de pratique professionnelle, une première constatation est qu'il existe des divergences entre les termes utilisés pour désigner le processus général de vérification et la validation de documents d'ingénierie. Ce constat est adopté comme hypothèse pour la construction de la stratégie de la recherche de documents dans la littérature scientifique, car le manque de termes cohérents pour désigner les processus de la vérification et de la validation est un frein au développement scientifique de ces processus (Dimyadi et al., 2016, p. 2). Le Tableau 2.1 donne le plan de concepts qui ressort de cette première partie de la stratégie adoptée pour la recherche bibliographique.

Tableau 2.1 Plan de concepts pour la recherche de documents scientifiques

 AND  AND  AND 				
	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
	Objet de la recherche	Termes rattachés	Secteur	Domaine d'étude
 OR 		<i>“engineering documents”</i> <i>“design solution”</i> <i>“design requirements”</i> <i>“BIM model”</i> <i>“design quality assurance”</i> <i>“design review”</i> <i>“model checking”</i> <i>“design documents”</i> <i>“engineering design process”</i> <i>“engineering model”</i> <i>“engineering system”</i>	<i>engineering</i>	<i>“construction industry”</i> <i>“civil engineering”</i>
	<i>verification</i> <i>validation</i> <i>verification and validation</i> <i>review</i>			

La première colonne du Tableau 2.1 est en lien direct avec l'objet de la recherche, soient les termes à décrire et à définir. La deuxième colonne contient les termes qui apportent de la précision sur le sujet recherché, tandis que les colonnes 3 et 4 désignent respectivement le secteur et le domaine d'étude considérés. Scopus est utilisé comme principale base de données pour la recherche, car « Scopus est la plus grande base de données de citations et de résumés provenant de la documentation examinée par les pairs : revues scientifiques, livres et articles de conférences. Scopus offre une vue d'ensemble complète du progrès de la recherche mondiale dans les domaines de la science, de la technologie » (Elsevier, 2022).

2.5.1 Critères d'évaluation de documents basés sur les titres, résumés et mots clés des articles

À partir du plan de concepts du Tableau 2.1, une stratégie de recherche a été élaborée dans le respect de la logique booléenne, car la recherche documentaire s'est faite uniquement de façon numérique. La recherche de documents scientifiques à partir des concepts du Tableau 2.1 est menée en trois étapes selon les domaines ciblés à l'avance, soit l'ingénierie en général afin de capturer les pratiques dans un plus grand bassin de données, susceptibles d'orienter les recherches et d'aider à la validité interne des résultats. Les deux autres domaines sont l'industrie de la construction pour maximiser les chances de trouver de la documentation qui aborde le sujet afin d'établir la base qui mène au spécifique, le génie civil qui est en fait le domaine ciblé, mais trop restreint. La démarche adoptée est celle de l'« entonnoir qui consiste à partir du général au spécifique » (Ben-Daoud, 2016).

Les documents sont recherchés dans Scopus à l'aide de formules de recherche filtrées selon les titres, les résumés et les mots clés des articles. Chaque titre de document est lu afin d'en déduire la pertinence de consulter le résumé ou non. Lorsque le titre est pertinent, une lecture du résumé est faite et si l'article montre un certain intérêt pour la vérification ou la validation en ingénierie, il est alors sélectionné pour un examen de contenu où le texte intégral est survolé. Si la lecture démontre que le document traite du sujet de la validation en ingénierie, alors, une sélection définitive est effectuée pour une lecture approfondie.

2.5.2 Nombre de références scientifiques recensées pour la vérification, validation ou la vérification et la validation en ingénierie (cas général)

Dans cette première phase, la recherche de documents scientifiques qui décrivent comment se déroule le processus de vérification et la validation inclut presque tous les domaines du génie. L'objectif est de partir d'un plus grand bassin de données, c'est-à-dire en considérant le domaine de l'ingénierie sans égards à la spécialité. Chaque formule (string) est composée des trois premiers concepts seulement à savoir « verification and validation, or validation or verification (concept 1) AND concept 2 AND engineering ». La recherche est effectuée dans les titres, les mots clés et le résumé à l'aide des formules formées. Le nombre de résultats renvoyés pour cette étape de la recherche est consigné dans le tableau Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Nombre de résultats pour le domaine de l'ingénierie

Concept 2 (limité par les concepts 1 et 3)	Nombre de résultats				
	Article de conférence	Article de journal	Revue de la littérature	Total	Retenu
« engineering documents »	5	6	0	11	1
« design solution »	29	23	3	55	3
« design requirements »	49	31	2	82	1
« BIM model »	5	6	0	11	3
« design quality assurance »	1	0	0	1	1
« design review »	41	9	1	51	1
« model checking »	114	19	0	133	0
« design documents »	12	6	0	18	0
« engineering design process »	26	19	2	47	0
« engineering model »	23	6	0	29	1
« engineering system »	112	81	3	196	2
Total	417	206	11	634	13

Selon le Tableau 2.2, 634 titres de documents sont consultés parmi lesquels 417 articles de conférences, 206 articles et 11 revues. 13 documents scientifiques ont été retenus cette fois après la lecture du résumé.

2.5.3 Nombre de résultats pour vérification, validation ou «vérification et validation» en se limitant à l'industrie de la construction

Cette étape de la recherche est plus spécifique, mais dans un domaine qui englobe le bâtiment, les ouvrages d'art et le génie civil, car selon le grand dictionnaire terminologique de l'Office québécois de la langue française, l'industrie de la construction est un secteur d'activité qui s'intéresse à l'ensemble des principes, des activités, des techniques et des matériaux qui concourent à la conception, à l'édification, à la rénovation ou à la démolition de bâtiments et d'ouvrages de génie civil.

La stratégie de recherche ici consiste à utiliser une formule à l'aide des concepts 1 à 4 du Tableau 2.1, le concept 4 pris en compte ici étant « Construction industry ». Chaque formule (string) est composée de « verification and validation, or validation or verification (concept 1) AND Concept 2 AND “Engineering” AND “Construction industry” ». La recherche est effectuée toujours dans les titres, les mots clés et le résumé à l'aide de strings formés. Les résultats renvoyés pour cette étape de la recherche sont consignés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Nombre de résultats pour le domaine de l'industrie de la construction

Concept 2 (limité par les concepts 1 et concept 3)	Nombre de résultats				
	Article de conférence	Article de journal	Revue de la littérature	Total	Retenu
« engineering documents »	0	1	0	1	0
« design solution »	0	3	0	3	0
« design requirements »	1	0	0	1	0
« BIM model »	5	5	1	11	0
« design quality assurance »	4	1	0	5	1
« design review »	0	0	1	1	0
« model checking »	1	1	0	2	0
« design documents »	0	3	1	4	3
« engineering design process »	65	154	9	228	7
« engineering model »	0	0	0	0	0
« engineering system »	0	0	0	0	0
Total	76	168	12	256	11

Un article est sélectionné pour un examen de contenu si le titre et le résumé de celui-ci montrent qu'il s'intéresse aux processus de vérification et de validation, dans ce cas, le corps de l'article est consulté pour une lecture rapide selon le même critère en vue d'une sélection pour une lecture approfondie. Comme on peut l'observer dans le Tableau 2.3, 256 titres de documents sont consultés dans cette section de la recherche parmi lesquels 76 articles de conférences, 168 articles et 12 revues. 11 documents scientifiques ont été retenus après la lecture du résumé et un survol du contenu de chaque document.

2.5.4 Nombre de résultats pour vérification, validation ou «vérification et validation» en se limitant au domaine du génie civil

La recherche effectuée ici est plus spécifique au domaine du génie ciblé à savoir le génie civil. Le principe de la recherche de documents dans la base de données Scopus reste le même. Les formules utilisées sont constituées des concepts 1 à 4 du Tableau 2.1, le concept 4 pris en compte ici étant «civil engineering». Chaque formule (string) est composée de verification and validation, or validation or verification (concept 1) AND “Concept 2” AND “engineering” AND “civil engineering”. La recherche est effectuée toujours dans les titres, les mots clés et le résumé à l’aide de formules formées. Les résultats renvoyés pour cette étape de la recherche sont consignés dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Nombre de résultats pour le domaine du génie civil

Concept 2(limité par les concepts 1 et concept 4)	Nombre de résultats				
	Article de conférence	Article	Revue de la littérature	Total	Retenu
« engineering documents »	0	0	0	0	0
« design solution »	0	1	0	1	0
« design requirements »	1	0	0	1	0
« BIM model »	0	1	0	1	0
« design quality assurance »	1	0	0	1	1
« design review »	0	0	0	0	0
« model checking »	1	1	0	2	0
« design documents »	0	0	0	0	0
« engineering design process »	93	63	5	161	0
« engineering model »	3	2	0	5	1
« engineering system »	1	1	0	2	0

Total	100	69	5	174	2
-------	-----	----	---	-----	---

Selon le Tableau 2.4, 174 titres de documents ont été consultés dans cette section de la recherche pour le domaine du génie civil dont 100 articles de conférences, 69 articles et 5 revues. Toutefois, seuls 2 articles ont été retenus après une lecture rapide du titre et du résumé.

2.6 Recherche de normes de l'industrie de la construction

La première stratégie adoptée pour ce cas consiste en une recherche dans diverses bases de données des organismes de réglementation du génie connus ou identifiés dans la littérature scientifique concernant les processus de vérification et de validation. La seconde consiste à suivre les recommandations de guides de pratiques professionnelles et d'experts du domaine. La dernière stratégie a été de recueillir les informations auprès des ingénieurs en entrevue concernant les normes utilisées dans l'industrie de la construction et qui permettraient de traiter le sujet de la vérification et la validation de documents d'ingénierie. Les organismes de réglementation du génie identifiés et leurs normes sur le sujet sont regroupés dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Résultats de la recherche des normes sur le sujet à l'étude

#	Normes identifiés	Type
1	ISO/IEC/IEEE 24765:2017(E) Systems and software engineering — Vocabulary	Normes
2	ANSI/EIA 632 SAE: Processes for Engineering a System (Issuing Committee: G-47 Systems Engineering)	Normes
3	Norme internationale ; ISO 19650-2:2018(F) : Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) : gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction. partie 2, phase de réalisation des actifs	Normes
4	ISO-9000:2015 Quality management systems — Fundamentals and vocabulary	Normes
5	ISO-9001:2015 Systèmes de management de la qualité — Exigences	Normes
6	Processes for engineering a system: an overview of the ANSI/EIA 632 standard and its heritage	Review
7	ISO 19650-1:2018(F) and ISO 19650-3:2018(F)	Normes
8	IEC 61160, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION	Normes

2.7 Recherche de plans de cours sur les processus de vérification et validation

2.7.1 Objectif

L'objectif est de documenter la façon dont sont enseignés les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans les écoles d'ingénierie du Québec. Pour cela, un inventaire des formations dispensées en lien avec ces processus est fait. Les plans et les descriptions des cours de ces formations seront examinés. Cet examen permettra d'identifier les différents types de littératures utilisées pour dispenser les cours qui permettraient à l'étudiant en ingénierie de la construction d'acquérir les aptitudes à pouvoir mener les

processus de vérification et de validation. Seules les écoles d'ingénierie situées au Québec sont considérées afin d'avoir un bassin de données raisonnables à explorer, soit un nombre d'écoles et une liste de programmes dont le contenu peut être exploré dans un délai raisonnable afin d'obtenir des résultats satisfaisants selon le type de recherche exploratoire choisie.

2.7.2 Démarche utilisée pour repérer les plans de cours

La démarche consiste à recenser toutes les écoles d'ingénierie du Québec, puis retenir celles qui enseignent le génie civil. Pour les écoles d'ingénierie qui enseignent le génie civil ou le génie de la construction, leurs programmes du département de génie civil sont passés en revues afin de retrouver les cours dispensés qui ont un quelconque lien avec le sujet de vérification et de validation de documents d'ingénierie. Le tableau de l'ANNEXE VIII présente la liste des écoles de formation d'ingénieurs au Québec qui ont été consultées. Les programmes de 11 universités sont passés en revue afin de vérifier le contenu des plans de cours susceptible d'enseigner la vérification et la validation de documents d'ingénierie ou tout simplement la vérification et la validation de la conception. Seules 3 écoles d'ingénierie du Québec sur les 11 écoles sélectionnées enseignent explicitement un cours qui correspond plus ou moins aux informations recherchées en lien avec les processus pouvant permettre de faire de la vérification et la validation de documents d'ingénierie en génie civil.

2.8 Recherche des guides de pratique professionnelle

La vérification et la validation de documents d'ingénierie sont des activités qui s'inscrivent dans la pratique exclusive de la profession de l'ingénieur. La profession d'ingénieur est une profession plus ou moins réglementée selon les pays. Chaque région du Canada possède son propre organisme de réglementation du génie. Au Québec, l'OIQ est responsable d'encadrer la pratique de l'ingénierie et de soutenir le développement de la profession afin d'assurer la protection du public. Une recherche est effectuée dans la base de données de chaque ordre des ingénieurs des différentes régions du Canada. « Les organismes de réglementation du génie des provinces et des territoires sont les membres d'Ingénieurs Canada. Ils réglementent la

profession d'ingénieur et délivrent les permis d'exercice du génie au Canada » (Ingénieur Canada, 2022).

Tous les ordres professionnels des ingénieurs et/ou les associations des ingénieurs disposent des sections ou des pages sur leurs sites web dédiés au développement professionnel de leurs membres. Il s'agit essentiellement de guides de pratiques édités sous différents thèmes du génie pour diverses spécialités. Les sites web des associations et ordres professionnels des ingénieurs possèdent chacun une zone de recherche permettant de retrouver un sujet ou un document. Le plan du site web est un bon outil pour obtenir un aperçu des contenus disponibles. À ce sujet, le Tableau-A VII-1 regroupe les organismes de réglementation du génie du Canada. Les expressions utilisées pour la recherche sur les différents sites web sont : Guide de pratiques, revue de la conception ou validation de la conception. Vu la diversité des différents sites web de ces ordres des ingénieurs, il est difficile de constituer ici une stratégie de recherche uniforme.

2.9 Entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs et les professeurs

2.9.1 Entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs

Nous avons réalisé des entrevues avec quatre ingénieurs et deux professeurs de génie civil en vue de recueillir de l'information sur le déroulement du processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie, sur le contexte du travail de l'ingénieur et sur les renseignements pertinents qui conduisent à recenser des écrits sur le sujet. Deslauriers (2019) définit l'entrevue de recherche comme étant « une interaction limitée et spécialisée, conduite dans un but spécifique et centrée sur un sujet particulier » (Deslauriers, 2019). Chaque participant à l'entrevue est considéré comme une source d'information choisie selon les critères bien définis qui sont :

- avoir la formation d'ingénieur et avoir de l'expérience en génie civil ou un domaine connexe;

- être un ingénieur actif, autorisé à exercer et familier avec la pratique concernant le processus de validation de documents d'ingénierie.

« En recherche qualitative on se sert plutôt des entrevues semi-dirigées avec un guide d'entrevue comportant un certain nombre de questions principales qui servent de grands points de repère ; l'intervieweur peut aller au-delà des questions posées, en même temps qu'il s'assure d'obtenir à peu près les mêmes renseignements des différentes personnes interrogées » (Deslauriers, 2019, p. 36(50)). Bien que toutes les questions de l'entrevue semi-dirigée n'ont pas besoin d'être toutes écrites à l'avance, une bonne préparation est tout de même nécessaire afin de s'assurer de couvrir entièrement le sujet. Il faut préparer quelques questions principales pour amorcer l'entrevue, et s'attendre aux ajustements de ces questions après la première entrevue au besoin. Les questions de l'entrevue semi-dirigées sont consignées à l'ANNEXE V . Ce guide d'entrevue comporte 3 questions principales et chacune des questions comporte des sous-questions. Les questions du guide ont été évaluées après la première entrevue et ajustées pour la suite des entrevues.

2.9.2 Entrevues semi-dirigées avec les professeurs de génie civil

Les entrevues avec les professeurs ont un objectif double : confirmer ou infirmer les constatations effectuées au cours de l'ensemble des activités de recherche dans ce projet et vérifier la possible omission de certaines pistes d'investigation qui aideraient à mieux cerner le sujet de recherche. Elles ont été menées après avoir complété toutes les activités de recensement de la littérature scientifique, des normes, des plans de cours en lien avec les processus de vérification et de validation et les entrevues avec les ingénieurs.

Les entrevues organisées avec chaque professeur se sont déroulées sur la base d'un questionnaire préalablement élaboré dont l'extrait est présenté à l'ANNEXE VI . Le questionnaire a deux points principaux : un résumé des constats dont il est question, suivi de deux questions. Avant la phase des questions, le résumé des constatations effectuées dans le cadre de cette recherche a été présenté à chaque professeur. Les aspects généraux des processus

de vérification et de validation ont été abordés afin de permettre une interprétation approfondie lors de l'analyse des résultats et surtout de s'assurer de la validité externe des résultats.

2.10 Considérations éthiques

Les bonnes pratiques suivies dans le cadre de cette recherche sont celles énoncées par Deslauriers (2019), qui stipule ce qui suit : « La personne qui accepte l'entrevue doit connaître les objectifs poursuivis par le chercheur avant de s'engager dans le projet; la personne doit savoir ce que le chercheur attend d'elle et ce qu'il entend faire avec les renseignements qu'elle lui livrera; les informateurs ont le droit de conserver l'anonymat et ce droit doit être respecté en tout temps, non seulement quand il a fait l'objet d'une entente formelle, mais aussi en l'absence d'indication contraire » (Deslauriers, 2019).

Cela étant, chaque personne invitée pour entrevue a été informée des objectifs de la recherche, de ce qui était attendu de lui et pourquoi on pensait qu'il était la bonne personne pour répondre aux questions. Les participants ont été informés de types d'informations qui allaient être conservées et comment elles allaient être exploitées.

Cette étude ne répond pas à la définition de la recherche avec des êtres humains et le fait que le comité d'éthique de la recherche (CER) évalue le projet n'est pas requis et d'ailleurs, une dérogation est obtenue à cet effet. Les entrevues se sont toutefois déroulées selon les bonnes pratiques avec l'usage des qualités qui favorisent un climat propice à la bonne communication tel que le respect de la personne et de la courtoisie.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS DE LA RECHERCHE

Ce chapitre présente les résultats de la recherche à partir de données collectées suivant la méthodologie décrite au chapitre précédent. Ces résultats sont structurés de façon à vérifier comment chaque piste explorée répond ou non à la question principale de la recherche (comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil?) et à ses sous-questions: quelle définition la littérature donne-t-elle de la vérification et de la validation? en quoi consistent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction? en quoi consiste l'authentification de documents d'ingénierie?

La démarche consiste à cerner comment chaque source considérée répond ou non à ces questions de recherche. Dans un souci d'assurer une cohérence entre ce chapitre et le chapitre sur la revue de la littérature, le présent chapitre présente tour à tour les résultats liés à l'analyse de documents de la littérature scientifique en ingénierie, les résultats liés à l'analyse de documents de la littérature scientifique en construction, les résultats liés à l'analyse des normes de l'industrie, puis les résultats liés à l'analyse de documents professionnels en construction. Les résultats des entrevues sont ensuite présentés en deux blocs : ceux liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs et ceux liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les professeurs.

3.1 Généralités

En ingénierie, les principaux termes utilisés pour désigner les activités de contrôle sont variés et diversifiés. On retrouve généralement la vérification, la validation, la validation et la vérification, la revue (la revue de la conception et la revue de documents de projet), la validation de la conception, la validation BIM (pour désigner la validation de modèles BIM, ou maquette numérique). Dans un contexte BIM, ces processus sont souvent désignés par plusieurs termes comme le "design verification and validation", "verification" ou "verify" ou

"check", "validation" ou "validate", "BIM validation". Ces termes sont généralement utilisés lors des activités de contrôle tels que : le "BIM model validation", le "clash detection" et le "code checking". Selon Maropoulos et Ceglarek (2010b), ces activités ou processus sont essentiellement ceux qui sont exécutés quand la conception et la modélisation ou le dessin sont achevés ou sur le point de l'être : « *The following observations are valid in relation to the present industrial practice for design verification and validation: Such activities are usually executed when the design process is almost complete, during prototyping and first-off testing and development* » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b, p. 3(742)).

Il est courant d'observer, tant dans la communication orale que dans la littérature, une confusion à propos de l'utilisation des termes de vérification et de validation. Maropoulos et Ceglarek (2010b), font remarquer que des articles de journaux et même des livres utilisent les termes de vérification et de validation de façon interchangeable en ces termes : « *For instance, journal articles and textbooks use the terms "verification" and "validation" interchangeably or in some cases there is a reference to "verification," "validation," and "testing (VV&T)" as if it were a single concept, with no discernible distinction among the three terms* » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b, p. 3(742)). D'un autre côté, Dybkaer (2011) affirme que cette confusion dans l'utilisation de terme validation et vérification se fait tant dans la communication orale qu'à l'écrit: « *In informal speech and writing, the terms "verification" and "validation" are often used interchangeably, but in vocabularies for many special languages, various distinct definitions of the concepts are found* » (Dybkaer, 2011, p. 1).

3.2 Résultats liés à l'analyse de la littérature scientifique en ingénierie

3.2.1 Définitions de vérification et de validation dans un contexte général en ingénierie

Il existe plusieurs définitions de vérification et de validation à travers la littérature scientifique dans divers domaines. Maropoulos et Ceglarek (2010b), définissent la vérification et la validation comme une méthode utilisée pour confirmer que le produit, le service ou le système rencontre respectivement les spécifications et utilisations prévues : « *Verification and*

validation are the methods that are used for confirming that a product, service, or system meets its respective specifications and fulfils its intended purpose. In general terms, verification is a quality control process that is used to evaluate whether or not a product, service, or system complies with regulations, specifications, or conditions imposed at the start of a development phase. Validation is a quality assurance process of establishing evidence that provides a high degree of assurance that a product, service, or system accomplishes its intended use requirements » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b). Ils précisent que la vérification correspond au processus de contrôle qualité tandis que la validation correspond au processus d'assurance qualité. Pour Gomez et al. (2014), « *Verification process answers the question: Are we making the product right? On the other hand, validation process addresses the question: Are we making the right product?* » (Gomez et al., 2014) Les différences entre les deux définitions sont données par Karkasinas et Rentizelas (2019), en ces termes: « *verification focuses on whether the product's characteristics have met the designer's expectations and, validation on whether the design of the product itself has met the consumers' expectations*» (Karkasinas & Rentizelas, 2019).

Le Tableau 3.1 tiré de Maropoulos et Ceglarek (2010b) présente les différentes définitions souvent utilisées en ingénierie pour désigner le processus de vérification et de validation dans un environnement numérique et physique.

Tableau 3.1 Définitions de la vérification et de la validation dans les domaines numérique et physique

Tiré de (Maropoulos & Ceglarek, 2010a, p. 742 (743 sur 720))

	Verification	Validation
V&V processes in digital design phase	<p>The process of evaluating software to determine whether the products of a given development phase satisfy the conditions imposed at the start of that phase [10]</p> <p>The process of determining that a computational model accurately represents the underlying mathematical model and its solution [11]</p> <p>The process of determining that a computer model, simulation, or federation of models and simulations implementations and their associated data accurately represent the developer's conceptual description and specifications [12]</p> <p>The process of determining the degree to which a modelling and simulation (M&S) system and its associated data are an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model [13]</p> <p>The process of determining that a model accurately represents the developer's conceptual description of the model and the solution to the model [14]</p> <p>Providing objective evidence that the design outputs of a particular phase of the software development lifecycle meet all of the specified requirements for that phase [15]</p>	<p>The process of evaluating software during or at the end of the development process to determine whether it satisfies specified requirements [10]</p> <p>The process of determining the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model [11]</p> <p>The process of determining the degree to which a model, simulation, or federation of models and simulations, and their associated data are accurate representations of the real world from the perspective of the intended use(s) [12]</p> <p>The process of determining that an M&S implementation and its associated data accurately represent the developer's conceptual description and specifications [13]</p> <p>The process of determining the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model [14]</p> <p>Confirmation by examination and provision of objective evidence that software specifications conform to user needs and intended uses, and that the particular requirements implemented through software can be consistently fulfilled [15]</p>
V&V processes in physical world	<p>Confirmation, through the provision of objective evidence, that specified requirements have been fulfilled [16]</p> <p>Provision of objective evidence that a given item fulfils specified requirements, such as confirmation that a target measurement uncertainty can be met [17]</p> <p>Pertains to the examination and marking and/or issuing of a verification certificate for a measuring system [18]</p> <p>Confirmation by examination and provision of evidence that the specified requirements have been fulfilled [19]</p> <p>The verification process ensures that the system implementation satisfies the validated requirements [20]</p>	<p>Confirmation, through the provision of objective evidence, that the requirements for a specific intended use or application have been fulfilled [16]</p> <p>Where the specified requirements are adequate for an intended use [17]</p> <p>Objective evidence that a process consistently produces a result or product meeting its predetermined requirements [19]</p> <p>Validation of requirements and specific assumptions is the process of ensuring that the specified requirements are sufficiently correct and complete so that the product will meet applicable airworthiness requirements [20]</p>

Ainsi, l'ensemble des définitions trouvées pour les processus de vérification et de validation permettent de fournir des preuves objectives par rapport aux exigences clairement identifiées et aux besoins des utilisateurs finaux. Ce que confirment Elich et al. (2012) en ces termes : « Looking at definitions of Verification and Validation, one generally sees that both activities are to provide objective evidence against clearly identified requirements and/or the user's needs » (Elich et al., 2012).

Les processus de vérification et de validation sont effectués selon l'environnement et l'objet sur lequel s'applique le processus, soit un produit, un service ou une construction. Cependant, les façons d'effectuer ces processus dépendent du domaine du génie. Par exemple, dans le

domaine du logiciel, la vérification ou la validation prend la forme d'entrée et de sortie d'instructions, tandis que dans les autres domaines il faut effectuer une recherche de preuves par des moyens de calculs, de simulations, etc. Dans tous les cas, selon Meyer (2016), « *All forms of validation ('demonstrative,' 'experimental,' 'interpretative,' 'methodological,' 'pragmatic') are rooted in the idea of evidence, which tends to support the designers' intention* » (Meyer, 2016).

3.2.2 Résultats liés à l'analyse du déroulement des processus de vérification et de validation en ingénierie

Les processus de vérification et de validation trouvés dans la littérature scientifique sont ceux exécutés dans un environnement numérique. Ces processus sont souvent appliqués sur des modèles ou des prototypes numériques. Selon Hartley et Starr (2010), il n'existe pas de modèle parfait, car : « *All models are wrong; but, some are useful* » (Hartley & Starr, 2010). L'industrie dispose de ressources documentaires permettant de se doter de moyens pour rendre ces modèles utiles et, parmi ces ressources, Chapurlat, Kamsu-Foguem, et Prunet (2003) présentaient la série de références suivantes : (AMICE, 1993), (Bernus, Mertins, & Schmidt, 1998), (Chen, Vallespir, & Doumeingts, 2002), (Chen & Vernadat, 2001), (Chorafas, 2002), (Crestani et al., 1997), (Bernus, 1999), (Loucopoulos & Kavakli, 1995), (Menzel & Mayer, 1998), (Revelle, 2002), (Scheer, 1998), (Tissot & Gruninger, 1999), (Vernadat, 1997), (Vernadat, 1999). Ces références sont constituées de programmes de modélisation, de normes, de modèles de référence d'architecture et d'outils dérivés leur permettant de décrire leurs processus, leurs systèmes d'information, leurs connaissances et leurs savoir-faire, de mieux comprendre et de mieux appliquer les outils de contrôle de l'organisation en utilisant par exemple des mécanismes de simulation, de communiquer plus efficacement dans l'entreprise, échanger des informations et des données de façon optimale, etc. (Chapurlat et al., 2003).

Le déroulement des processus de vérification et de validation est souvent basé sur des concepts. Une cartographie regroupant des concepts génériques de ces processus est proposée par Chapurlat et al. (2003). Cette cartographie est présentée à l'ANNEXE X . Les concepts

présents sur cette cartographie ont été définis indépendamment d'un domaine en particulier et peuvent être adaptés selon chaque organisation. Ces concepts sont généralement formulés en tenant compte des propriétés et des caractéristiques du modèle, la spécialité, le type de modélisation, les normes de construction et l'ensemble des exigences du projet.

3.3 Résultats liés à l'analyse de la littérature scientifique en construction

3.3.1 Définition de la vérification et de la validation dans l'industrie de la construction

Selon Kwasniewski et Bojanowski (2015), la vérification et la validation sont appliquées aux modèles numériques pour simuler la réalité afin de résoudre des problèmes de conception, éliminer ou minimiser les erreurs potentielles de cette dernière : « *Today verification and validation is recognized as the primary method for evaluating the confidence of computer simulations* » (Kwasniewski & Bojanowski, 2015). Ils élaborent leurs projets sur la validation de modèle numérique à l'aide de schémas mathématiques modélisés pour représenter une certaine réalité. D'autre part, MacLeod (2007) donne ces définitions de vérification et de validation liées au domaine de la structure : « *The definitions of validation and verification used in the IStructE use of computers report are:*

- *Validation: the process of checking that the models and the software are appropriate to their intended purpose;*
- *Verification: checking that the models and the software have been correctly implemented* » (MacLeod, 2007, p. 5).

Peu de définitions de vérification et de validation ont été trouvées dans la littérature scientifique en construction. La littérature trouvée en construction sur le sujet est plus centrée sur les activités de contrôle effectuées dans un contexte BIM. Les termes et expressions utilisés pour désigner les processus de vérification et/ou de validation dans ce contexte sont énoncés dans les résultats de la sous-section suivante.

3.3.2 Résultats liés à l'analyse du déroulement du processus de vérification et de validation dans l'industrie de la construction

La complexité en conception dans l'industrie de la construction s'intensifie et les processus de vérification et de validation automatisés deviennent une nécessité, ce qu'affirme Nawari (2012) en ces termes : « *The complexity in the building design and building construction process is increasing and the need for automatic model checking is becoming critical* » (Nawari, 2012). Dans la littérature scientifique limitée au domaine de la construction, les exemples présentés pour décrire le déroulement des processus de vérification et la validation sont pour la plupart liée au contexte BIM. Selon Solihin et Eastman (2015), le besoin d'automatiser les règles de vérification remonte du début des années 1960. Solihin et Eastman (2015) donnent les raisons pour lesquelles d'autres règles de vérification doivent être mises sur pied en ces termes: « *Because the role of BIM itself changes throughout the building lifecycle, rule checking covers a broad scope within the AEC Industry and its practices. Eastman [...] suggested that besides building regulatory code-checking, more specialized types of rule checking such as client's requirements and requirements for specific building types are also emerging* » (Solihin & Eastman, 2015, p. 2 (70)). Il s'agit pour les auteurs de documents d'ingénierie de faire la vérification du contenu du modèle numérique selon les exigences établies. Selon Makisha (2019), « *The primary task of verification of information models, according to the author, is to check the quality of the model in accordance with the requirements of normative and technical documents, as it is its results that can have a direct impact on the decision on the examination of project documentation, as well as on the safety of the constructed object*» (Makisha, 2019).

Les activités de contrôle ne doivent pas intervenir seulement à la fin du processus de conception, mais tout au long de celui-ci comme le souligne Andrich et al. (2022), en ces termes: « *However, it is emphasized that, in order to obtain effective results, it is necessary to apply the check flow also in other moments of the detailed design phase and not only at its conclusion*» (Andrich et al., 2022). Ils précisent que les activités de contrôle doivent inclure, au minimum, le BIM validation, le "clash detection", le "code checking", le "model output" et

le "minimum requirements". Ces activités sont celles exécutées dans le processus du "Model checking".

Le "BMC" ou le "Model checking" n'est pas clairement défini dans l'industrie de la construction selon cette affirmation de Hjelseth (2015), « *Model checking is not a clearly defined term* » (Hjelseth, 2015). Il précise le fait que plusieurs concepts utilisés pour décrire le processus de vérification et de validation de modèles BIM sont souvent utilisés comme des synonymes, ce qu'il affirme en ces termes : « *Compliance checking, rule checking, code checking, clash detection, collision control, and validation are used as synonyms for BMC, but without further specification, precise and joint understanding can be hard to achieve* » (Hjelseth, 2015). Ce dernier affirme que le "model checking" est souvent utilisé comme synonyme du "clash detection" en ces termes : « *Use of BMC, or "model checking," is often used synonymously with clash detection* » (Hjelseth, 2015). Il affirme également que le "model checking" remplace la validation traditionnelle des dessins en ces termes : « *BMC replaces or supports the traditional quality assessment of drawings* » (Hjelseth, 2015).

Le "model checking" est décrit de différentes façons dans la littérature scientifique. Selon Dimyadi et al. (2016), le "model checking" peut être exécuté sous la base des quatre concepts présentés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Déroulement du "model checking" selon Dimyadi et al. (2016)

Concepts	Descriptions
Concept type 1: <i>Validation checking</i>	<i>The intention with validation checking is to verify that the designed solution in the BIM is within the defined rules in the rules set. Rule sets can be based on multiple sources like codes, normes, contracts, best practice, or by other defined requirements.</i>
Concept type 2: <i>Model content checking</i>	<i>The intention with model content checking is to have an automatic process for checking of the content in the BIM. The intention here is to examine the professional content in a BIM model for a specified use. This type of model checking is especially relevant at handover of the model, or before processing for calculation and other information intensive activities such a compliance checking.</i>

Concept type 3: <i>Smart object checking</i>	<i>The intention with smart object checking is to let the object itself observe its environment and automatically adapt to this by embedded predefined rules or algorithms.</i>
Concept type 4: <i>Design option checking</i>	<i>The intention with the design option checking concept is to guide the designer to consider a larger range of realistic solutions than is practical without this support. This is particularly relevant in areas where the designer is not an expert or experienced.</i>

Selon Hjelseth (2015), “BMC system consists of three parts: software; BIM-files; and rule sets. BMC processes predefined rules, so the scope of review is determined by the selected rule-set” (Hjelseth, 2015). Le Tableau 3.3 présente les quatre concepts de déroulement de "model checking" selon Hjelseth (2015).

Tableau 3.3 Concepts de “model checking” selon Hjelseth (2015)

Concepts	Descriptions
Concept 1: <i>Validating model checking</i>	<i>Validating model checking, or compliance checking, is the most frequent use of BMC. This type of checking is based on comparing the model with pre-defined criteria.</i>
Concept 2: <i>Guidance</i>	<i>The intention of this concept is to guide the designer to consider a larger range of most used solutions according to best practice rules.</i>
Concept 3: <i>Adaptive model checking</i>	<i>Active objects or intelligent objects are an alternative description for this type of checking.</i>
Concept 4: <i>Content checking of information in BIM-file</i>	<i>Content checking can be regarded as a declaration of delivered information. The intention here is to examine the BIM model for a specific purpose.</i>

De ces concepts, Hjelseth (2015), présente une classification du *BMC* du niveau 1 au niveau 5 en fonction de la complexité des règles numériques et du contenu de l'information dans le modèle BIM. La Figure-A XI-1 de l'ANNEXE XI présente cette classification et l'ANNEXE XII présente une revue des fonctions des différents logiciels BMC qui permettent l'atteinte de niveaux de cette classification. Cependant, selon Seiß (2019), «*the development of the model check depends on the available building information, the supported functions of the software as well as the available rules. The kinds of rules which will be performed can be divided into content, validation and adaptive checking. Adaptive checking describes objects which must be modelled according to their constrains* » (Seiß, 2019). Le Tableau 3.4 définit les tâches de "model checking" que propose Seiß (2019).

Tableau 3.4 Tâches de *model checking* selon Seiß (2019)

Tâches	Descriptions
<i>Content checking</i>	<i>Content checking deals with the question, if all necessary object information's are in the model. The aim of this content check is the verification of a previously defined component-related LOD.</i>
<i>Validation checking</i>	<i>Based on the results of the content checking, the check of the tenant building description can be done. So, the content checking is always done before the validation checking to ensure that all necessary properties are included.</i>

La validation de modèle se limite pour Seiß (2019) aux concepts de "*Content checking*" et de "*validation checking*". Selon la Figure 3.1 le *model checking* se résume en un contrôle des contraintes et exigences de la maquette numérique et du caractère complet de cette dernière.

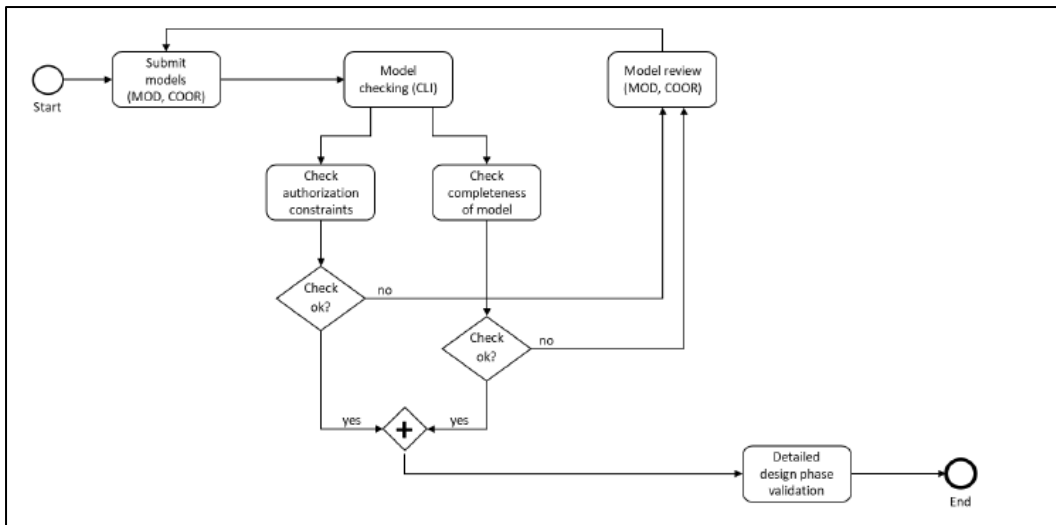


Figure 3.1 *Model checking activities*
Tirée de Andrich et al. (2022, p. 9)

La vérification et la validation de modèle dépendent de plusieurs facettes dont il faut tenir compte. Selon Makisha (2019), ces facettes sont : « *Facet "Subject of Verification," Facet "Source of Requirements," Facet "Range of Applicability," Facet "Stage of the Life Cycle," Facet "Type of Information to Be Checked"* » (Makisha, 2019).

Tableau 3.5 *BIM information's models inspections selon Makisha (2019)*

Facets	Facets descriptions
<i>Subject of Verification</i>	<i>Completeness of the model or verification of entirety of the model</i>
	<i>Quality of model</i>
<i>Source of Requirements</i>	<i>Regulation requirements</i>
	<i>Construction practice-base requirements</i>
	<i>Customer requirements</i>
	<i>Requirements based on recommended</i>
<i>Range of Applicability</i>	<i>All the buildings and facilities</i>
	<i>Specific types of buildings and facilities</i>
	<i>Certain project of buildings or facilities</i>

<i>Stage of the Life Cycle</i>	<i>Verification of design models</i>
	<i>Verification of building models</i>
	<i>Verification of service models</i>
<i>Type of Information to Be Checked</i>	<i>Geometric information: The verification of geometric information includes checks for the absence of intersections of model elements (collisions) or inconsistencies (overstated distances between elements), as well as the requirements of normative and technical documentation related to the assessment of sizes, areas, volumes.</i>
	<i>Non-geometric information refers to qualitative or quantitative characteristics that are not related to the geometric parameters of the object or element. For example, the temperature and humidity in the room, the requirements for the materials used and others.</i>

L'élaboration des processus pour les activités de contrôle dépend de plusieurs facteurs à prendre en compte, dont le type d'activité de contrôle, le type de modèle, les types d'exigences du projet, le cycle de vie du modèle. Les activités de contrôle prennent la forme de revue lorsqu'elles sont menées au niveau multidisciplinaire.

3.3.3 La revue de la conception et la revue de documents de projet dans l'industrie de la construction

Selon MacLeod (2007), la revue concerne les activités de contrôle exécutées au niveau multidisciplinaire. «*The use of computers report advises that an outcome of the process should be a modelling review document. This should be a report on the outcomes of the control activities and an overview*» (MacLeod, 2007). Dans le contexte BIM, le *model checking* est considéré comme une activité de contrôle effectuée par l'ingénieur et une activité de *revue* au niveau de la coordination interdisciplinaire. Andrich et al. (2022), proposent une cartographie (voir Figure 3.1) qui inclut la revue de modèles BIM avec cinq phases au lieu des trois phases traditionnelles. Les deux phases ajoutées sont la phase de vérification des exigences minimales et celle de la vérification des résultats de sortie de modélisation comme le montre l'extrait suivant.

“The Check Flow has been divided into five main check phases of the BIM model (the three typical phases of model checking to which two have been added), listed below in the chronological order in which they must be carried out:

- *minimum requirements: necessary and indispensable phase to be able to perform the checks foreseen in the following phases and, for this reason, called ‘phase 0’;*
- *BIM validation: phase necessary to ascertain the level of quality and internal consistency of the model;*
- *clash detection: phase of check of geometric interferences;*
- *code checking: phase of check of conformity of the model to the reference normes for building design;*
- *model output: phase of check of the correct production of drawings extrapolated from the model” (Andrich et al., 2022).*

En construction, les activités de contrôle de modèles numériques constituent un besoin réel. Cependant, *« it is difficult to find detailed guidelines about checking methods that can be used to control building information models. An analysis of the scientific literature highlighted the availability of documents containing general indications about checking methods, but none of them goes into details providing detailed technical prescriptions »* (Andrich et al., 2022).

3.3.4 Authentification de documents d’ingénierie selon la littérature scientifique

Après un examen minutieux de la littérature scientifique, nous n’avons pas été capables d’identifier des documents de la littérature scientifique qui traitent explicitement le sujet concernant le processus d’authentification de documents d’ingénierie ou de l’apposition de signatures, ou du sceau d’ingénieur le cas échéant, sur les documents d’ingénierie. La communication des résultats de la conception au client, la revue de la conception, la validation de la conception par le client sont souvent utilisées dans la littérature pour désigner la phase qui marque la fin de la conception. Dans tous les cas, l’auteur de documents d’ingénierie doit

identifier ses documents d'ingénierie par ses marques distinctives. Ces marques distinctives, dans le cas du Québec, doivent identifier l'auteur de documents d'ingénierie de manière irréfutable et démontrer que celui-ci est autorisé à poser les actes d'ingénierie; cette étape est désignée au Québec par l'expression authentification.

3.4 Résultats liés à l'analyse des normes de l'industrie

3.4.1 Définition de la vérification et la validation selon les normes de l'industrie

Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs définitions pour la vérification et la validation qui ne concordent pas toujours avec les définitions qu'on retrouve dans les normes de l'industrie de la construction comme le précisent Maropoulos et Ceglarek (2010b), en ces termes : « *Verification and validation have been defined in various ways that do not necessarily comply with standard definitions* » (Maropoulos & Ceglarek, 2010b, p. 3(742)). Le caractère générique de ces définitions est la cause de cette confusion selon Bubshait et Al-Atiq (1999), « *The generic nature of the normes often leads to differences in interpretations* » (Bubshait & Al-Atiq, 1999). Cependant, la plupart des normes trouvés donnent des définitions de vérification et de validation presque identiques comme présentées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Définition de la vérification et la validation selon les normes

Types de normes	Définition de la vérification et la validation
(ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015b art. 3.8.12&.13 (ISO 15188, ISO 17511, ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17000, ISO 15189)	« Vérification : Confirmation par des preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites.
	Validation: Confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites »(ISO - Organisation internationale de normalisation, 2015a).
ANSI/EIA 632	« Verification: confirmation by examination and provision of objective evidence that the specified requirement to which an end product is built, coded, or assembled have been fulfilled.
	Validation: confirmation by examination and provision of objective evidence that the specific intended use of an end product, or an aggregation of end products, is accomplished in an intended usage environment»(SAE - Society of Automotive Engineers, 2021).
JCGM 200 :2008 entry 2.44 and 2.45	Verification: provision of objective evidence that a given item fulfills specified requirement(s), taking any measurement uncertainty into consideration.
	Validation: verification, where the specified requirements are adequate for an intended use.

Selon le Tableau 3.6, les normes ISO où les définitions de vérification et de validation sont trouvées, et la norme ANSI/EIA 632, portent sur la recherche de preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique et les exigences des utilisateurs finaux ont été satisfaites. Cependant, la norme JCGM 200 :2008 considère la validation comme une forme de vérification.

3.4.2 Résultats liés à l'analyse du déroulement des processus de vérification et de validation selon les normes

La norme ISO 9001:2015 à la section 8.3 donne des recommandations génériques sur le déroulement des processus de vérification et de validation tandis que l'ISO 19650-2 :2018(F) donne les balises qui permettent à l'organisation d'élaborer un processus de contrôle de modèle dans un contexte numérique. Le travail collaboratif est mené par une équipe de projet qui comprend un coordinateur appelé partie désignante, l'équipe de production (ingénieur et autres) appelée partie désignée. L'ingénieur est considéré comme la partie désignée principale et les autres membres de l'équipe de production constituent l'équipe de travail. Le processus de contrôle des modèles BIM dans ce contexte prend la forme d'activités de contrôles effectuées selon les étapes suivantes :

- l'équipe de travail procède à une revue du conteneur d'information (les ressources partagées et celles produites) ;
- l'équipe de production procède ensuite à la revue du modèle d'information avant le transfert du modèle à la coordination ;
- enfin, le coordinateur BIM procède à la revue de coordination.

Dans le cadre de la pratique de l'ingénierie dans un contexte BIM, le conseil de l'Institut pour le BIM au Canada attire un éventail d'auteurs et de collaborateurs autour des sujets portant sur le BIM. Il est l'auteur du "Manuel de pratique canadien pour la MDB". Ce manuel présente des illustrations génériques du développement itératif du flux de travail de conception dans un projet. Les recommandations en rapport aux processus de vérification et de validation de modèle renvoient à la série de la norme ISO 19650.

3.4.3 La revue en ingénierie selon les normes

La revue en ingénierie est une activité de contrôle du travail de l'ingénieur au niveau de l'équipe multidisciplinaire et n'a pas pour but de concevoir, mais d'affiner les résultats d'une conception : « Une revue de conception est une activité de conseil. Elle est prévue en premier lieu pour apporter une vérification du travail de l'équipe de développement et pour fournir des

recommandations, quand cela est possible, pour améliorer le produit ou le procédé et sa réalisation. Il convient donc de considérer la revue de conception comme une procédure d'affinement et non comme une procédure créative» (IEC - International Electrotechnical Commission, 2005). La Figure 3.2 tirée de cette norme présente les différents niveaux où une revue est requise en cours de conception.

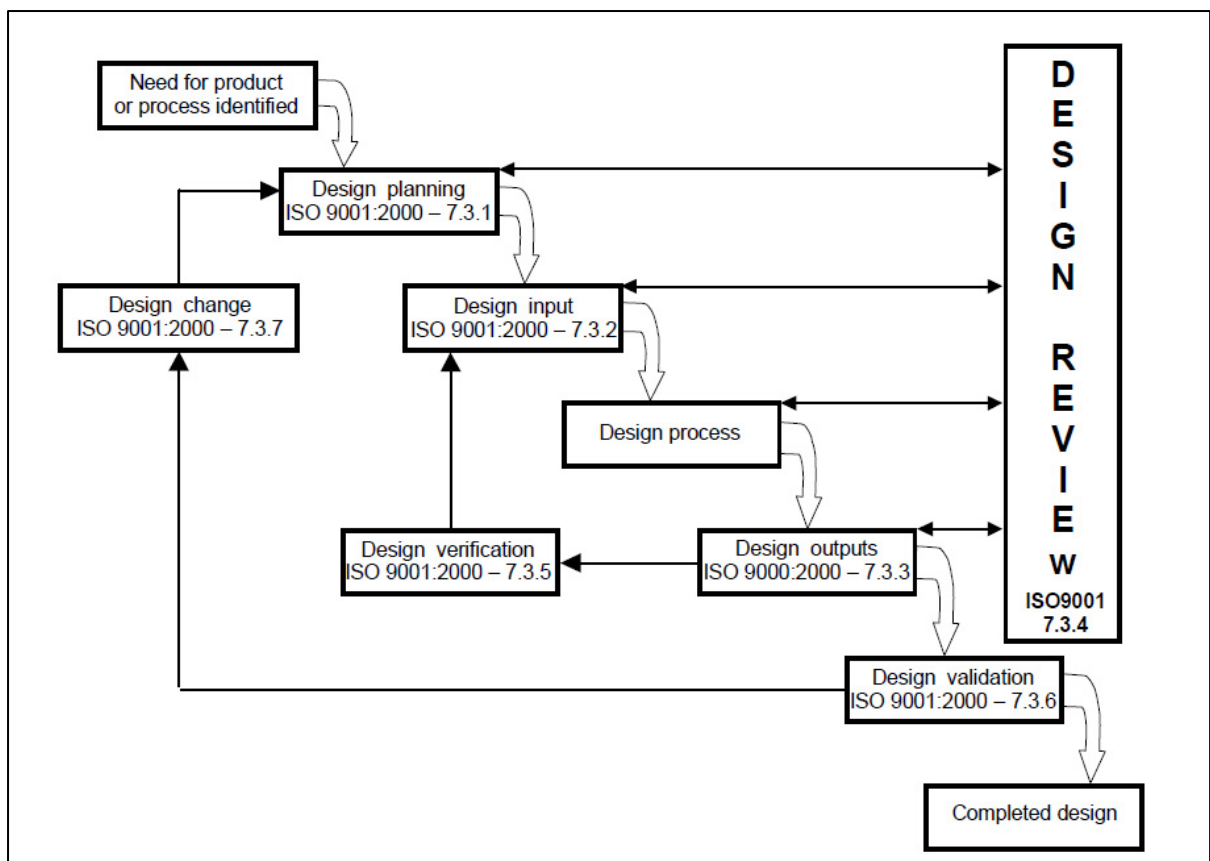


Figure 3.2 Exemple de processus de conception
Tirée de (IEC - International Electrotechnical Commission, 2005)

La Figure 3.2 présente un exemple de cartographie du processus de conception et il ressort de cela que la norme IEC 61160 est un complément à la série de la norme ISO 9000. Cette norme donne des recommandations quant au déroulement du processus de revue qui est une activité complémentaire des processus de vérification et de validation menés par l'ingénieur en

conception : “Il convient de ne pas confondre la revue de conception avec la gestion quotidienne d’un projet. Les revues de conception correctement menées augmentent la confiance dans un bon déroulement des activités de conception et de développement en conformité avec les exigences requises pour un produit, et cela tout au long de sa durée de vie” (IEC - International Electrotechnical Commission, 2005). Les principes énoncés par cette norme confirment les idées retrouvées dans la littérature scientifique énoncées plus haut, car la revue de la conception est une activité de groupe menée par l’organisation dans le but d’obtenir une plus grande qualité des documents d’ingénierie.

3.5 Résultats liés à l’analyse de documents de guide de pratique professionnelle

Les documents professionnels retenus qui abordent les sujets de vérification, de validation et de revue de documents d’ingénierie sur les sites web des différents organismes de réglementation du génie sont consignés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Guide de pratique professionnelle pour la vérification et la validation

#	Organisme	Guide retenu
1	Engineers Nova Scotia	<ul style="list-style-type: none"> • NS Practice Review Guidelines August 9 2016
2	Professional Engineers and Geoscientists of Newfoundland and Labrador (PEGNL)	<ul style="list-style-type: none"> • Guideline for Preparation of Engineering and Geoscience Drawings and Technical Specifications
3	OIQ	<ul style="list-style-type: none"> • Guide de pratique professionnelle • Guide d'étude pour la préparation de l'examen professionnel
4	Engineers and Geoscientists British Columbia	<ul style="list-style-type: none"> • EGBC-Documented-Checks-of-Eng-Geosci-Work-V2-0 • EGBC-Documented-Indep-Rev-of-HRPAW-V1-0 • EGBC-Documented-Indep-Rev-of-Structural-Designs-V2-0

Les concepts tirés des guides du Tableau 3.7 en lien avec le sujet de la vérification, de la validation et de la revue de documents d’ingénierie sont pertinents pour répondre à la question de la recherche. Les lignes suivantes présentent les exigences par rapport à l’authentification

et la préparation des documents d'ingénierie et terminent par les recommandations des organismes de réglementation du génie sur les processus de vérification et de validation des documents d'ingénierie.

3.5.1 Contribution de l'ingénieur à l'élaboration de documents d'ingénierie

L'OIQ reconnaît seulement 3 contributions de l'ingénieur à l'élaboration de documents d'ingénierie : Préparer, modifier et vérifier. Toutefois, la loi sur les ingénieurs donne des précisions complémentaires sur la contribution de l'ingénieur quant à la préparation de document d'ingénierie : « Dans le cadre de l'exercice de l'ingénierie, sont réservées à l'ingénieur, lorsqu'elles se rapportent à un ouvrage visé à l'article 3, les activités professionnelles suivantes: préparer, modifier, signer et sceller un plan, un devis, un rapport, un calcul, une étude, un dessin, un manuel d'opération ou d'entretien, un plan de déclassement ou un cahier des charges» (LégisQuébec, 2022). Le guide de l'examen de l'OIQ précise la possibilité d'utiliser d'autres termes pour désigner sa contribution à l'élaboration de documents d'ingénierie, car il énonce que la restriction de la contribution de l'ingénieur par l'OIQ est juste dans un souci d'uniformisation de termes : « Ce n'est pas la terminologie qui détermine l'acte professionnel, mais la finalité de celui-ci. Toutefois, l'Ordre reconnaît et soutient que l'utilisation d'une terminologie commune permet une compréhension uniforme, partagée, qui laisse le moins de place possible à l'interprétation [...] L'OIQ reconnaît une terminologie commune : Préparer, Modifier, Vérifier» (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a). La loi sur les ingénieurs et l'OIQ énoncent les actes de préparer et modifier, tandis que seul l'OIQ énonce l'acte de vérifier comme une troisième contribution de l'ingénieur à l'élaboration de documents d'ingénierie. L'authentification est le dernier acte de l'ingénieur sur les documents d'ingénierie avant leur transmission hors de l'organisation ou leur utilisation à des fins de construction.

3.5.2 Authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Chaque organisme de réglementation du génie au Canada émet ses propres recommandations sur l'authentification des documents d'ingénierie. Dans toutes les situations, seul un membre en règle de l'organisme concerné peut procéder à cet acte exclusif.

Selon le guide de pratique de l'OIQ, l'authentification est le dernier geste qu'un ingénieur doit poser sur un document d'ingénierie : c'est l'action d'apposer sa signature et dans le cas échéant son sceau d'ingénieur afin d'officialiser un document d'ingénierie et le rendre apte à une utilisation précise : « L'authentification est l'apposition de la signature de l'ingénieur et, le cas échéant, du sceau à un document d'ingénierie sur support papier ou technologique afin de l'officialiser par rapport à une finalité donnée» (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a). Par ailleurs, l'OIQ ne précise pas de façon explicite les actions qui précèdent directement l'authentification dans le cadre du processus de conception. Cependant, l'ingénieur se doit de prendre les mesures qui s'imposent afin d'émettre des documents d'ingénierie complets, exhaustifs et sans ambiguïté.

3.5.3 Vérification de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Selon l'OIQ, la vérification de documents d'ingénierie peut se faire avant ou après leur authentification, ceci selon les termes du cahier de charges ou à la demande du client dans le but d'obtenir une plus grande qualité de documents d'ingénierie concernés. L'ingénieur qui effectue ces types de vérification n'est pas considéré comme l'auteur de documents d'ingénierie vérifiés. Les trois types de vérifications reconnues par l'OIQ sont : la vérification avant l'authentification, la vérification après l'authentification et la vérification de conformité. «La vérification avant l'authentification d'un document par son auteur s'insère habituellement dans un processus d'assurance qualité de l'auteur, ou de l'entreprise de l'auteur, et vise à obtenir une plus grande qualité dudit document. La vérification après l'authentification d'un document par son auteur, également appelée seconde opinion » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a). Selon l'OIQ, la vérification ainsi effectuée est considérée comme une

vérification effectuée par un ingénieur qui n'est pas l'auteur ou qui n'agit pas comme l'auteur de documents d'ingénierie. Elle peut être effectuée avant ou après l'authentification de documents d'ingénierie concernés.

Selon l'EGBC, la vérification est « Quality Control process to confirm that the underlying work is complete, meets all Input Requirements, and is suitable for its intended use or purpose. Checking may be carried out by qualified individuals independent of, or associated with, the work being Checked, or by Professional Registrants who prepared the work » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021a). Toujours selon l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021a), le processus de vérification, la fréquence et l'ingénieur en règle responsable des activités de vérification doivent être planifiés et prévus. Une fois la fréquence de la vérification planifiée, il faut développer les activités réelles ou les tâches à effectuer dans le cadre du processus et la façon dont elles seront effectuées.

3.5.4 Validation de documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Selon l'APEGA, « Validation is the process through which a Responsible Member demonstrates that a PWP meets the quality control and assurance measures described in a permit holder's Professional Practice Management Plan » (APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta, 2020). L'APEGA recommande à ces membres de procéder à une validation si les documents sont produits par un ingénieur en règle de l'APEGA.

Selon l'OIQ, l'ingénieur doit s'assurer que ses résultats sont complets et valides : « L'ingénieur s'assure de la validité de toutes les hypothèses, sans exception. Si les hypothèses ne semblent pas valides, il amorce un processus itératif avec de nouvelles hypothèses, jusqu'à leur validation. L'ingénieur voit à faire réviser et valider ses calculs et autres opérations afin d'éviter toute erreur ou omission » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a).

L'OIQ ne donne pas plus de précision sur la manière de procéder à la validation de documents d'ingénierie, car c'est à l'ingénieur que revient la responsabilité de trouver des moyens de pouvoir valider ou faire valider ses résultats. L'approbation de documents d'ingénierie est demandée dans la majorité des cas par le client afin d'assurer la qualité de documents obtenus. « L'Ordre ne s'oppose pas à la pratique en vertu de laquelle le cheminement hiérarchique de documents d'ingénierie authentifiés est attesté par les signatures successives d'autres personnes qui peuvent ou non être membres de l'Ordre. Cependant, c'est un procédé d'ordre strictement administratif qui est étranger à l'acte professionnel » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a). Donc l'OIQ considère le processus d'approbation de documents d'ingénierie comme un simple acte administratif.

3.5.5 La revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Très peu de recommandations sur le déroulement de la revue de documents d'ingénierie ont été trouvées sur les sites web des organismes de réglementation du génie. Dans toutes les situations rencontrées, la revue des documents d'ingénierie désigne les activités de contrôle effectuées sur les documents d'ingénierie avant leurs mises à disposition pour utilisation.

Selon l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b), « *The Independent Review process is intended to produce a professional assessment of the adequacy of the design approach, its execution, and the Documentation. It evaluates the associated Documents to determine whether the structural systems appear complete, consistent, and in general compliance with relevant code and design requirements. The Independent Review may be part of, but is not intended to replace, the regular checks of Regulated Practice required by the Bylaws.* » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b)

L'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b) parle de la revue indépendante et la définit de la façon suivante : « *An Independent Review is a documented evaluation—conducted by an experienced Professional Registrant who has not been involved in preparing the design—of the structural design concept, details, and Documentation based*

*on a qualitative examination of the substantially complete structural design Documents before the Documents are issued for construction or implementation » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b). La revue indépendante ne remplace en aucun cas la vérification de la conception. La revue indépendante est effectuée après la vérification des documents d'ingénierie et ceci doit se faire avant leur transmission et leur utilisation à des fins de construction. En génie des structures, la différence entre la revue indépendante et la vérification est donnée par l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b), en ces termes : « *Structural design checks do not generally satisfy the requirements of an Independent Review. A design check identifies deficiencies but may be limited to evaluations of individual components by different individuals, some of whom may have been involved in the detailed design of other portions of the project. Conversely, an Independent Review does not satisfy the requirements of a structural design check as it does not include detailed evaluation of all components*» (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b). La revue est donc une activité d'affinement qui ne contrôle pas les éléments de détails de la conception comme on peut le constater sur l'extrait de la Liste de vérification de la Figure 3.3 dont l'intégralité figure à l'ANNEXE XIII .*

ITEM	REVIEWED	REMARKS
	INITIALS	
1. Design code loadings and serviceability limits		
2. Material specifications and geotechnical recommendations		
3. Concept and integrity of the gravity load resisting system		
4. Concept and integrity of the lateral load resisting system (e.g., wind, seismic)		
5. Drawing completeness and continuity of load paths		
6. Design check of representative structural elements		
7. Review of representative structural details		
8. Concerns discussed with the Professional of Record		

Figure 3.3 Extract of an Liste de vérification for an independent review
Tirée de l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b, pp. A-3(29))

L'EGBC prévoit un type de revue particulière pour des travaux de haut risque qu'elle nomme par "High-Risk Professional Activities or Work (HRPAW)". La détermination d'un HRPAW dépend du niveau de risque que les travaux de l'ingénieur représentent pour le public : « The determination of whether a project includes HRPAW and requires an Independent Review is based on the Risk level before mitigation measures have been incorporated into the Professional Activities or Work » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b). L'exigence d'une HRPAW ou non dépend de l'évaluation documentée du niveau de risque pour le public effectué par un ingénieur en règle de l'EGBC : « *An Independent Review is not required if the Professional of Record has determined through a documented Risk Assessment that the Professional Activities or Work are either low Risk or medium Risk (i.e., not HRPAW)* » (EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia, 2021b). La Figure 3.4 montre une représentation du niveau de risque à sélectionner.

LIKELIHOOD OF CONSEQUENCE	5	Frequent	5	10	15	20	25
	4	Probable	4	8	12	16	20
	3	Occasional	3	6	9	12	15
	2	Remote	2	4	6	8	10
	1	Improbable	1	2	3	4	5
LEGEND			Insignificant	Minor	Moderate	Critical	Catastrophic
<ul style="list-style-type: none"> ■ Extreme Risk ■ High Risk ■ Moderate Risk ■ Low Risk ■ Minimal Risk 			1	2	3	4	5
SEVERITY OF CONSEQUENCE							

Figure 3.4 Exemple d'une matrice de risque
Tirée de l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b, pp. B-5(47))

Selon l'EGBC, la revue est requise pour tout risque élevé. La Figure 3.5 présente un exemple de "Liste de vérification" à utiliser pour ce type d'activité de contrôle.

ITEM	REVIEWED	REMARKS
	INITIALS	
Criteria for carrying out Professional Activities or Work		
Applicable codes, standards, and other requirements (laws, regulations, design requirements, etc.)		
Geographical and/or environmental conditions and requirements		
Assumptions for Professional Activities or Work		
Concept for Professional Activities or Work		
Test and analysis procedures and results		
Quality control and quality analysis procedures		
Calculations or analysis of representative elements		
Review of representative details		
Integration of third-party components and artifacts		
Representation of output (e.g., drawings, reports, spreadsheets, models)		
Hazards (current and future) identified in the Risk Assessment		
Adequacy and implementation of mitigation measures		
Concerns discussed with the Professional of Record		
For global, repetitive, or iterative design, recommendation for intervals of Independent Review		

[continued...]

Figure 3.5 Liste de vérification exemple for an independent review of HRPWW
Tirée de l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b, pp. A-3(39))

Le guide de pratique professionnelle de l'OIQ fait mention de plusieurs types de revue dont la revue de documents de projet et la revue de conception. La revue de conception « a lieu généralement lorsque plusieurs domaines ont été mis à contribution dans la conception. L'objectif est de permettre la mise en commun des divers avis sur des éléments particuliers et d'en assurer l'intégration » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a, p. 44). Elle est considérée comme faisant partie des activités de coordination de la conception interdisciplinaire. C'est le même concept trouvé dans la littérature scientifique à la seule différence que l'OIQ émet des suggestions afin d'éliminer les retards dans la chaîne des activités de contrôle. La Figure 3.6 donne un exemple de déroulement de processus de revue

de la conception impliquant 4 disciplines : la structure, le civil, la mécanique du bâtiment et l'électricité du bâtiment.

Un exemple : préparation de plans et devis pour une construction multiétage à vocation industrielle

Des ingénieurs des quatre domaines — structures, civil, mécanique du bâtiment et électricité du bâtiment — y travaillent en étroite collaboration.

L'ingénieur responsable de l'intégration prend les moyens nécessaires pour rendre compte de toutes les anomalies, incompatibilités et redondances provoquées dans les trois autres domaines par un changement dans les éléments de conception d'un domaine.

Le rapport d'ingénierie détaillée est également révisé par chaque ingénieur concepteur. Une séance de travail commune favorise les discussions sur ces révisions, ce qui permet de détecter les erreurs ou les incongruités et de déterminer la façon de les éliminer.

Dans le cas d'ouvrages importants, il n'est pas rare que la revue de conception dure plusieurs jours et nécessite des rencontres supplémentaires documentées par des comptes rendus. Généralement, les changements apportés à la conception sont regroupés dans un document distribué aux ingénieurs concepteurs.

Figure 3.6 Exemple de revue de conception selon l'OIQ
Tirée de l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021a, p. 44)

L'exemple de la Figure 3.6 montre que la revue de la conception exige un travail de groupe qui peut durer de plusieurs heures à plusieurs jours. Chaque ingénieur reçoit un rapport de changements à intégrer aux documents d'ingénierie et les instructions pour ces intégrations dans un délai prescrit. « L'ingénieur s'assure, par un système de révisions, que les changements de la revue de conception ont été pris en compte, entre autres dans les plans et devis » (OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec, 2021a, p. 44). Selon l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b, p. 45 (51)), l'ingénieur pourra produire une version finale des documents d'ingénierie pour permettre au client de prendre une décision éclairée concernant la réalisation du projet.

L'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b) suggère deux types de revue pour ses membres, la revue de type 1 et la revue de type 2. Le type de revue à appliquer pour des documents d'ingénierie donnés doit être déterminé selon les critères énoncés dans le guide disponible. C'est à l'entreprise ou à l'ingénieur en règle de définir le type de revue selon les recommandations de IEGBC, de planifier les activités d'analyse et d'implémenter le processus de revue.

3.6 Les résultats des entrevues

3.6.1 Résultats liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs

Cette section présente les résultats des entrevues avec les ingénieurs de l'industrie de la construction sélectionnés pour les entrevues. Tous les participants utilisent les termes de validation et de vérification pour désigner l'ensemble des opérations qui leur permette d'assurer que les documents d'ingénierie sont conformes aux exigences, complets et non ambigus. Les termes de vérification et de validation de la conception sont utilisés de façon récurrente au cours des entrevues pour désigner le déroulement du processus de validation. Les questions posées étaient centrées particulièrement sur le déroulement du processus de validation de documents d'ingénierie. L'emploi des termes de la vérification et de la validation de façon interchangeable a été observé, et ceci pour l'ensemble des participants. Les participants ont utilisé à certains moments les termes *vérifié* et *validé* pour décrire le résultat d'un processus de validation qui aboutit à l'authentification de documents d'ingénierie.

Selon l'ensemble des participants, à l'étape prévue pour la validation et la vérification avant l'authentification de documents d'ingénierie, plusieurs professionnels peuvent être sollicités au besoin. Le degré de sollicitation dépendra de l'information à valider et dans le cas de la validation de modèles numériques ou de dessins complexes, l'ingénieur responsable de la conception a généralement recours au service du modelleur ou dessinateur afin de valider certains aspects de la conception. Selon le participant 1, la consultation avec le modelleur peut durer une demi-journée ou plus. Le participant 3 insiste sur le fait que dans tous les cas il y a toujours un ingénieur responsable de la conception qui coordonne les différentes implications

des autres professionnels. La validation est décrite par l'ensemble des participants comme un processus qui doit être exécuté tout au long de la conception et non seulement à une étape précise de ce dernier. Il peut arriver qu'une information indispensable à la poursuite de processus de validation soit manquante. Dans une telle situation, l'ingénieur est obligé de souvent marquer un arrêt et poursuivre une fois l'information manquante disponible.

Généralement, la vérification et la validation de documents d'ingénierie se font au fur et à mesure que la conception avance. Toutefois, à la fin de la conception, un délai est requis pour s'assurer que les livrables répondront aux besoins identifiés à l'origine du projet. Les avis divergent quant à la durée à allouer à cette étape. Les participants énoncent que la validation de la conception fait partie du processus intégral de la conception, ce qui implique que sa durée ne peut être déterminée à l'avance de façon objective. Les participants ont émis des points de vue différents concernant la durée de la validation de documents d'ingénierie avant l'authentification. Les durées recueillies qu'il faut allouer à l'étape de validation de documents d'ingénierie avant l'authentification allaient de 1h à 2 semaines dépendant du type de projet, de l'ampleur du projet, de l'équipe de projet et du type d'information à valider. Toutefois, parlant de la validation de documents d'ingénierie par son auteur, les trois participants sont d'avis que la durée peut être la même que celle allouée à la conception.

Les ingénieurs interrogés ont été unanimes sur le fait que la façon dont l'information était représentée dans les maquettes numériques pouvait dans certains cas porter à confusion. Le point commun entre ces interventions a trait à certaines informations contenues dans le PDF 3D issus de la maquette numérique qui apportent des ambiguïtés et laissent la place à l'interprétation. Selon le participant 1, en géologie, la représentation de l'information de sol par une succession de surfaces planes sur les PDF 3D à authentifier n'est pas exacte et laisse planer une certaine ambiguïté. Pour le participant 2, en hydrologie, la représentation de l'information de la surface du liquide et des différents niveaux sur un PDF 3D peut induire en erreur, car cette représentation ne reflète pas la réalité souhaitée. Pour le participant 3, le même constat est fait en géotechnique sur la représentation de l'information des couches de sol, du

niveau de la roche et des quantités que peut fournir le livrable PDF 3D issu de maquettes numériques qui peut être sujet à interprétation.

Le Tableau 3.8 ci-dessous donne une synthèse des réponses obtenues selon l'objet de la question posée.

Tableau 3.8 Synthèse des entretiens avec les ingénieurs

Objet des questions sur le processus de la validation	Réponses obtenues			
	Ingénieur 1	Ingénieur 2	Ingénieur 3	Ingénieur 4
Durée du processus de validation	Une à deux semaines	Une journée ou deux	1h à durée conception	Même durée que celle allouée à la conception
Différentes étapes du processus	Non connues	Non connues	Non connues	Aucune réponse
Documentation nécessaire et outils utiles	Plans, Maquette, Liste de vérification, notes...	Plans & devis ...	Notes, plans, devis technique normalisé(DTN)...	Notes, plan et Liste de vérification.
Processus entièrement observable	Peut-être	Possible	Pas évident	Aucune réponse
Peut faire un récit d'un processus de validation passé	Oui	Oui	Oui	Oui
Quels documents pouvant illustrer les étapes du processus de validation	Ne sait pas	Ne sait pas	Ne sait pas	Ne sait pas

D'après le Tableau 3.8, les quatre ingénieurs ont des avis partagés sur la durée du processus de validation de documents d'ingénierie, car c'est un processus dont la durée varie d'un projet à un autre et d'un ingénieur à un autre. Les réponses obtenues concernant la durée de la validation de documents d'ingénierie avant signature vont de 1 h à deux semaines. Il faut préciser qu'il s'agit ici de la durée de la validation à l'étape qui précède directement l'authentification des documents d'ingénierie.

Nous n'avons pas cependant été en mesure d'obtenir une réponse concernant les différentes étapes du processus de validation. Les participants ont affirmé qu'il est difficile d'anticiper sur les différentes étapes sans avoir entamé le processus de validation.

Les participants émettent l'idée selon laquelle observer le déroulement du processus de validation reviendrait presque à suivre l'entièreté du processus de conception. Cependant, ils admettent que l'observation de la validation finale des documents d'ingénierie reste un objectif atteignable. Cela étant, les ingénieurs 1 à 3 pensent que l'observation sur site est le meilleur moyen d'obtenir de l'information sur le déroulement de ces processus.

Les ingénieurs 1 à 4 ont eu la possibilité de faire un bref récit de processus de validation auxquels ils ont déjà participé. Parmi les outils cités, les ingénieurs 1 et 4 ajoutent la Liste de vérification comme un outil nécessaire pour mener à bien ce processus, mais affirment tous les deux ne s'en être jamais servis, ni même avoir vu un autre ingénieur s'en servir.

3.6.2 Résultats liés à l'analyse des entrevues semi-dirigées avec les professeurs de génie civil

Les entrevues dans cette catégorie avaient pour but de confirmer ou d'infirmer les observations effectuées dans le cadre de cette recherche. Deux professeurs d'université ont répondu favorablement à l'invitation en entrevue semi-dirigée.

La somme de données collectées ne permettait pas de dégager de cadres théoriques ou pratiques ni de façons de procéder à la vérification et la validation de documents d'ingénierie. Les points abordés étaient en lien avec les résultats obtenus dans ce chapitre, en particulier sur les points suivants :

- difficultés qu'a l'industrie de la construction à documenter les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie;
- le rôle de l'OIQ dans le développement des processus de vérification et de validation;
- le caractère générique des recommandations de l'OIQ et des normes.

Selon les professeurs 1 et 2, la plupart des processus sont développés au niveau des entreprises et ne sont pas partagés pour des raisons évidentes de confidentialité liée à la concurrence associée au phénomène de fragmentation dans l'industrie de la construction. Cette situation

représente un frein au développement des processus comme celui de vérification et la validation de documents d'ingénierie dans cette industrie.

Selon le professeur 2, le caractère particulier de l'industrie de la construction avec un nombre important et diversifié de domaines est un frein au développement de certains processus. Le phénomène de complexité dans l'industrie de la construction fait en sorte qu'il est difficile d'énoncer des façons de faire vu l'infinité de solutions possibles qui existent. Les exigences du client dont dépend l'existence du projet sont difficiles à cerner avant qu'elles soient exprimées. Comme l'affirme le professeur 2, il existe très peu ou presque pas de documents scientifiques qui traitent le sujet de validation dans certains domaines du génie tel que le génie urbain, pour la raison que le risque qu'une erreur de conception de chaussée cause la mort d'un usager est presque nul.

Selon le professeur 1, l'OIQ est chargé de la surveillance de la pratique de l'exercice d'actes réservés à l'ingénieur au Québec. Le guide de pratique professionnelle est l'outil principal mis à la disposition des ingénieurs. De plus des formations adaptées à certaines situations particulières comme celles de processus de vérification et validation de documents d'ingénierie sont souvent disponibles auprès de l'OIQ et de ses partenaires.

Cependant, les deux professeurs affirment que les ingénieurs doivent se plier à certaines exigences dans le cadre de l'exercice des actes réservés à l'ingénieur au Québec. Plusieurs actions ont été prises par le législateur afin de protéger le public des actes que peut poser l'ingénieur dans la société. Les deux professeurs sont d'avis que, dans le contexte québécois, l'OIQ est la première référence qu'il faut consulter pour obtenir des recommandations sur le processus de validation. Selon le professeur 1, les recommandations que donne la norme ISO 9001 sur le processus de validation sont assez générales et ces recommandations ne sont pas explicitement réservées à la validation de documents d'ingénierie. De plus, selon le professeur 2, le cahier de charges dont dépend la conception est rédigé pour un projet unique et, tout comme les exigences du client, le contenu des cahiers de charges reste un mystère avant qu'il ne soit rédigé, ce qui rend difficile la possibilité de prévoir les façons de le valider.

Les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie sont essentiels pour les activités d'ingénieur en conception, car ils permettent à l'ingénieur de s'assurer de répondre aux exigences du cahier de charges et de s'assurer que sa conception répond bien aux exigences du client, des normes et réglementations en vigueur. Toutefois, l'industrie de la construction est un secteur bien particulier et il arrive parfois, pour la plupart des processus aussi importants que la vérification et la validation de documents d'ingénierie, que les façons de procéder ne soient pas toujours clairement établies.

Tableau 3.9 Synthèse des entrevues avec les professeurs

Objet de la question en lien avec les processus de vérification et de validation	Réponses obtenues	
	Professeur 1	Professeur 2
Encadrement du processus	<ul style="list-style-type: none"> - Voir guide de l'OIQ - Voir ISO 9001 	<ul style="list-style-type: none"> - Voir guide de l'OIQ - Normes et codes de lois
Autres sources disponibles	Ne sais pas	Ne sais pas
Commentaires sur les raisons de nos résultats	<ul style="list-style-type: none"> - normes et guide de l'OIQ sont génériques; - les firmes de génie-conseil sont les mieux indiquées pour fournir de l'information sur le processus de vérification et la validation; - phénomène de fragmentation est un frein au développement de processus. 	<ul style="list-style-type: none"> - l'ingénieur doit utiliser ses connaissances sur le sujet afin d'élaborer ses propres concepts; - processus non valorisé en construction du fait que l'impact sur la vie est minime; - exigences du client à valider non connue d'avance.

Comme montré au Tableau 3.9, au Québec, malgré les recommandations de l'OIQ, l'organisme de réglementation du génie au Québec et la disponibilité de normes et standard, l'uniformité des façons de procéder à la vérification et la validation de documents d'ingénierie n'est pas assurée, car les recommandations émises sont génériques. Une analyse des résultats de ce chapitre permettra de comprendre les données recueillies au cours de cette recherche.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET DISCUSSION

Ce chapitre présente une analyse et une discussion des résultats dans l'ordre suivi au chapitre précédent. Il aborde donc tour à tour l'analyse et la discussion des résultats tirés de la littérature scientifiques en ingénierie, de la littérature scientifiques en construction, de la littérature relative aux normes de l'industrie, et des guides de pratiques professionnelles. Ensuite sont abordées l'analyse et la discussion des entrevues semi-dirigées avec les ingénieurs et avec les professeurs. Enfin, les limites de la recherche sont discutées.

4.1 Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique en ingénierie sur les définitions de vérification, de validation et de revue

Cette recherche a permis de retrouver plusieurs définitions de vérification, de validation et de revue en ingénierie. Cependant, l'étude étant essentiellement liée au domaine de la construction, l'emphase est mise sur la vérification, la validation et la revue de documents d'ingénierie en phase d'implantation à l'étape de dessins et spécification selon le cycle de vie type d'un projet de construction présenté sur la Figure 1.1. Les définitions trouvées sont celles proposées par Maropoulos et Ceglarek (2010b), Gomez et al. (2014), Karkasinas et Rentizelas (2019).

Nous avons constaté qu'à l'étape de dessins et spécification, la vérification permet de confirmer par des preuves objectives l'adéquation entre la conception de l'ingénieur et les exigences spécifiées lors de l'initialisation du projet tandis que la validation permet de confirmer par des preuves objectives la prise en compte des exigences requises pour un usage spécifique dans les livrables. À l'étape de la modélisation, nous avons aussi constaté que la vérification et la validation de modèle numérique permet de confirmer l'adéquation entre le modèle numérique et la conception de l'ingénieur. Le modèle numérique peut être utilisé par l'ingénieur pour aider le client afin que ce dernier puisse confirmer la prise en compte de toutes ses exigences lors de la conception.

Nous avons constaté que la revue en ingénierie est une activité de contrôle des livrables de l'ingénieur au niveau multidisciplinaire. Peu de documents abordent le sujet de la revue de documents d'ingénierie au niveau de l'équipe d'ingénieur d'une seule discipline. Dans une équipe d'ingénierie, lorsque plusieurs membres participent à la réalisation des objectifs du projet, la revue des livrables est organisée afin de déceler des erreurs et omissions dans les livrables pour ensuite émettre à l'issue du processus des recommandations sur les façons d'éliminer ces derniers.

Nous avons constaté qu'il existe une certaine confusion dans l'utilisation de vérification, de validation et de test sur le produit, le service dans la littérature scientifique. En effet, les définitions trouvées pour ces termes ne font pas la différence entre la vérification et la validation de services d'une part et la vérification et la validation de produits d'autre part. Cependant, les normes nous permettent de comprendre la différence entre la démarche entreprise par l'ingénieur pour fournir un service d'ingénierie et celle entreprise pour la conception d'un produit dans un contexte industriel.

4.2 Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique en construction sur les définitions de vérification et de validation

La littérature scientifique montre que la vérification et la validation sont des processus importants pour la conception, particulièrement dans l'industrie de la construction à cause de la complexité des systèmes à concevoir et de celle des modèles numériques issus de cette conception. Nous avons constaté à travers les articles de Kwasniewski et Bojanowski (2015), MacLeod (2007), et de Elich et al. (2012) que la vérification et la validation sont reconnues comme les principales méthodes d'évaluation de la confiance aux modèles et simulations numériques. L'activité de conception en phase de design dans un contexte numérique contient plusieurs tâches, dont la définition des exigences et spécifications, la définition des processus, leurs élaborations et implémentations dans l'organisation du projet. Selon MacLeod (2007), la vérification permet de démontrer que le logiciel est utilisé de façon adéquate pour l'atteinte de ces objectifs, tandis que la validation permet de vérifier si le modèle obtenu répond aux besoins

d'utilisabilité, car « l'objectif de l'utilisabilité s'établit selon l'efficacité, l'efficience et la satisfaction de l'utilisateur » (Usabilis, 2022).

La revue en construction est définie comme une activité de contrôle réalisée au niveau multidisciplinaire. C'est une activité de groupe réalisée dans le but de déceler les erreurs, omissions et ambiguïtés dans les livrables fournis. Cependant, les mêmes activités peuvent être menées par l'ingénieur au sein de son équipe sur ses livrables avant leurs transmissions à la coordination du projet. Ainsi, la revue en ingénierie peut être perçue comme une activité de contrôle menée par la coordination, non seulement au niveau multidisciplinaire selon la plupart des articles, mais aussi au niveau de l'équipe de l'ingénieur.

4.3 Analyse et discussion des résultats de la littérature scientifique sur le déroulement des processus de vérification, de validation et de la revue de documents d'ingénierie

Selon MacLeod (2007), pour élaborer un processus de vérification et de validation, il faut tenir compte de l'activité créatrice en jeu (il s'agit du type de conception et l'étape du projet où on se trouve). En plus du type d'activité, il faut tenir compte des exigences, des spécifications et besoins des utilisateurs finaux. Cependant, les besoins des utilisateurs finaux ne sont pas toujours connus d'avance, ce qui rend difficile l'élaboration de certains aspects du processus de vérification et de validation. L'ordre d'exécution et les façons d'exécuter ces processus ne sont pas toujours clairement définis. L'évaluation des exigences, la validation du modèle et la vérification des documents d'ingénierie sont des activités de contrôle effectuées par l'ingénieur. Ces activités prennent le nom de revue lorsque celles-ci sont exécutées au niveau multidisciplinaire ou au niveau hiérarchique de l'organisation. MacLeod (2007) met en évidence les éléments du processus de modélisation qui permettent d'avoir une représentation de ce que sont les activités de contrôle des documents d'ingénierie. Les activités de conception, modélisation et production impliquent successivement les tâches suivantes :

- la définition et l'évaluation des exigences ;

- l'élaboration du concept et des notes de calcul qui aboutissent à la vérification des notes, des résultats et la validation des hypothèses ;
- la définition du modèle et la modélisation qui aboutissent à la vérification et la validation du modèle ;
- la production des documents d'ingénierie qui aboutit à la vérification et la validation de ces derniers.

Selon Acampa et al. (2019), Dimyadi et al. (2016), Hjelseth (2015), Seiß (2019) et Makisha (2019), les activités de contrôles de documents d'ingénierie sont menées dans un contexte BIM. Selon eux, un modèle BIM doit subir au moins les trois activités de base de "Model checking" afin que le modèle soit considéré comme étant validé. La validation BIM ou la validation de contenu du modèle, la détection d'interférence et le "code checking" constituent les trois activités principales du "*model checking*". Selon Acampa et al. (2019), le "*model checking*" est un processus peu défini dans le contexte BIM et même si c'est une expression déjà utilisée dans un autre domaine et dans un contexte différent. De plus, les auteurs Dimyadi et al. (2016), Seiß (2019), Hjelseth (2015), et Andrich et al. (2022) s'accordent plus ou moins sur ce qu'est le "model checking" dans le contexte BIM. Cependant, les descriptions qu'ils donnent pour chaque activité de "model checking" convergent. Andrich et al. (2022) ajoutent deux activités aux activités traditionnelles de "BIM model checking" qui portent le nombre d'activités à cinq au lieu de trois. Cependant, les deux activités ajoutées par ces derniers sont des variantes de "model content checking".

La littérature fait souvent référence aux Liste de vérifications comme outil nécessaire pour mener à bien les activités de contrôle du modèle numérique et des documents d'ingénierie dans le contexte BIM. Cependant, peu de documents qui traitent le sujet donnent des exemples de Liste de vérifications ou donnent les procédures permettant de les élaborer. De plus, il est constaté que la littérature scientifique mentionne le problème de la complexité pour en assurer la prise en compte dans l'industrie de la construction. L'élaboration d'une liste de contrôle peut-être un excellent moyen d'avoir la certitude que tous les paramètres cernant cette

complexité sont pris en compte dans la planification des activités de contrôle de modèles numériques.

Nous avons constaté que les activités de model checking sont nommées par plusieurs termes différents. Certains auteurs considèrent ces activités comme étant des concepts, alors que d'autres les considèrent comme des étapes, des phases ou tout simplement des tâches. Cependant, ces termes ont pour seul but de nommer le type de problème à résoudre dans les modèles BIM ou maquette numérique. Bien que certains auteurs donnent des explications sur leurs préférences dans le choix de l'utilisation d'un terme en particulier, tout cela rend difficile la compréhension commune des activités de contrôle dans un contexte BIM.

4.4 Analyse et discussion des résultats de définitions de vérification, de validation et de revue selon les normes de l'industrie

L'OIQ recommande aux ingénieurs de considérer l'information fournie particulièrement par la norme ISO. Ceci donne une indication pour la source à utiliser par les ingénieurs au Québec et, par conséquent, la norme à privilégier au cours de cette recherche. Cependant, dans la pratique de l'ingénierie, les définitions données à la vérification et à la validation ne sont pas toujours claires. Les résultats ont montré que la vérification et la validation ne sont pas clairement définies, ce qui nous a amenés à nous intéresser aux normes d'industries autres que celui de la construction.

Certaines des définitions trouvées tant pour la vérification que pour la validation semblent tirer leurs origines de la définition que propose la série de la norme ISO 9000 énoncés ci-après en guise de rappel: la vérification est la « confirmation par des preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites » (ISO9000:2015 (3.8.12)); la validation est la « confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites » (ISO9000:2015 (3.8.13)).

La cartographie de la Figure 4.1 illustre la relation entre les deux définitions ci-dessus à savoir la vérification et la validation. On peut trouver ici la différence entre les deux processus, ce qui peut expliquer la confusion souvent mentionnée entre l'utilisation des deux termes.

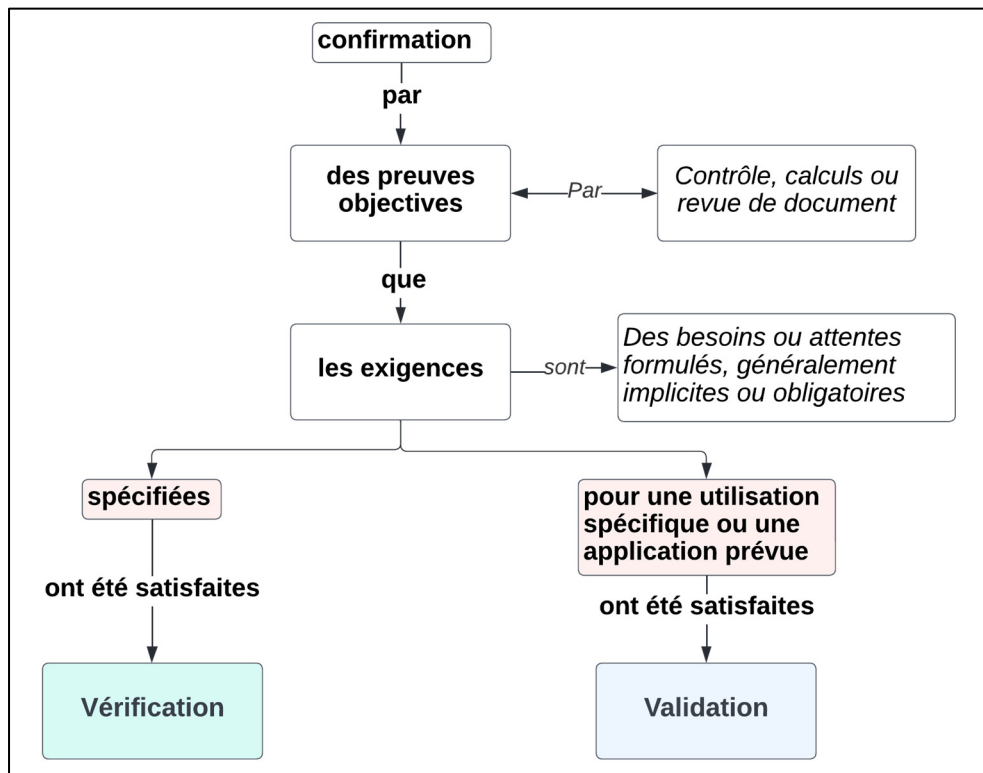


Figure 4.1 Différence entre la vérification et la validation à partir de définitions d'ISO 9001

Les normes ISO-9001, 2015 art. 3.8.12&.13 (ISO 15188, ISO 17511, ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17000, ISO 15189, l'ANSI/EIA 632 et la JCGM 200 :2008 entry 2.44 and 2.45 semblent tous avoir les mêmes origines, car les définitions qu'ils fournissent conduisent aux mêmes conclusions : fournir des preuves objectives que les exigences ont été satisfaites.

Malgré l'avantage que confère le caractère générique de ces définitions comme le fait de rendre ces définitions polyvalentes, cet aspect est souvent mis en cause pour expliquer les nombreuses définitions données à la vérification et à la validation dans la littérature scientifique. Sur la

Figure 4.1, un seul point différencie les deux définitions : le type d'exigences, soit les exigences spécifiées pour la vérification et les exigences spécifiques à l'usage pour la validation.

Les exigences sont définies par la norme ISO 9000:2005 comme des besoins ou attentes formulés généralement implicites ou obligatoires. La note ajoute à propos des exigences du client que l'organisation doit les satisfaire, et ce, même celles qui ne sont pas formulées. Le projet naît pour satisfaire aux besoins d'un client; or ces besoins ou exigences ne sont pas toujours complets, clairs ou précis et c'est à l'organisation de les faire émerger. C'est ici que ressort l'avantage du caractère générique de la définition de validation et vérification, car l'ingénieur a ainsi une base de référence pour construire sa propre façon de faire. Cependant, l'inconvenant de cette situation est qu'il est difficile de parvenir à une uniformisation des pratiques en lien avec les développements et applications des processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie.

4.5 Analyse et discussion des résultats de déroulement des processus de vérification, de validation et revue de documents d'ingénierie selon les normes

Les normes émettent des recommandations génériques à propos des processus de vérification, de validation et de la revue de documents d'ingénierie selon les résultats montrés au chapitre précédent. Ces recommandations ont pour objectif d'aider l'organisation à élaborer ses propres processus de vérification, de validation et de revue. Il y a d'ailleurs une précision dans la norme qui indique que ces recommandations sont génériques. L'ISO 9001:2015, à son article 8.3, permet à l'ingénieur ou à l'organisation de mettre en place les activités à inclure et celles à proscrire lors de l'élaboration du processus de vérification, de validation et de revue en ingénierie. Cependant, il est nécessaire d'avoir une base qui permettrait à l'ingénieur ou à l'organisation d'élaborer ces processus à travers des concepts uniformes. La norme ISO dispose d'exemples de cartographies qui permettent de poser une base à l'élaboration de ces processus.

Dans le contexte de la validation BIM, l'ISO 19650-2:2018(F) utilise l'expression *activités de contrôle* pour désigner les processus qui permettent de vérifier, de valider et de procéder à la revue de modèle numérique. Le fichier BIM est divisé en deux parties : Le conteneur d'information qu'est le modèle BIM et l'information qui se trouve dans le conteneur. Toutefois, les séquences de tâches permettant de compléter les activités de contrôle ne sont pas décrites.

Nous avons constaté que la série de la norme ISO 19650:2018 utilise des termes simples pour décrire les problèmes qu'on peut rencontrer dans les modèles. Ces problèmes qui peuvent être d'ordre spatial, opérationnel ou temporel, devraient être détectés le plus tôt et non après la livraison du modèle d'information. La description de ces problèmes par la norme ISO 19650:2018 permet de les assimiler au "*clash detection*" ou détection d'interférence traitée dans la partie des résultats de la littérature scientifique.

La gestion collaborative de l'information est basée sur une organisation hiérarchique des équipes et un flux de travail. On constate dans cette solution que l'information est distribuée par une personne désignée, seule l'équipe responsable du modèle d'information peut modifier ce dernier et la traçabilité des échanges d'information est assurée.

Les recommandations de l'ISO 19650:2018 semblent plus complètes et plus précises sur les façons de faire en comparaison aux recommandations émises dans la série d'ISO 9000:2015 et l'IEC 61160. Comme on peut constater sur la Figure 3.2, l'IEC 61160 recommande des processus de vérification et de validation séparés et ponctuels contrairement à ce qui est recommandé dans la littérature scientifique sur le sujet.

L'utilisation de termes neutres dans l'ISO 19650:2018(F) pour décrire les activités de contrôle et les problèmes qu'on peut rencontrer dans un modèle numérique en construction est un exemple à suivre qui peut favoriser une compréhension commune des concepts abordés et le développement des recherches sur le sujet. L'utilisation de l'expression *activité de contrôle de*

modèle au lieu de "model checking" peut être utilisée afin de laisser le moins de place à la confusion de termes déjà utilisés dans un autre domaine dans un contexte différent.

4.6 Analyse et discussion des résultats tirés des guides de pratiques professionnelles selon les organismes de réglementation du génie

Les organismes de réglementation du génie régulent la profession d'ingénieur et délivrent les permis d'exercice du génie au Canada selon le site web engineerscanada.ca. Cependant, les recommandations concernant les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie sont génériques lorsqu'ils sont disponibles. Cette section présente l'analyse des résultats présentés dans le chapitre précédent sur les processus de vérification, de validation et de revue de documents d'ingénierie abordés dans les différents guides de pratique professionnelle.

Les organismes de réglementation du génie recommandent à leurs membres d'élaborer leur propre plan de management de la qualité ou d'adopter celui de leur entreprise. Dans toutes les situations, une vérification des documents d'ingénierie est requise si on s'en tient aux recommandations de l'EGBC.

Selon l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021a) et l'OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec (2021b), la vérification des documents d'ingénierie est effectuée par un ingénieur qui n'est pas l'auteur des ceux-ci. Pour l'EGBC, la vérification peut être de deux types : de type 1 lorsqu'elle est effectuée par un ingénieur de la même entreprise que l'auteur des documents d'ingénierie et de types 2 lorsque la vérification est effectuée par un ingénieur externe de l'entreprise de l'auteur des documents d'ingénierie.

L'OIQ décrit trois types de vérifications et donne une description sommaire qui permet de comprendre dans quel contexte une vérification de documents d'ingénierie peut être demandée et effectuée. Chacun des trois types de vérification de documents d'ingénierie (la vérification avant authentification, la vérification après authentification et la vérification de conformité) est effectué sur demande ou selon la politique de l'organisation en matière de contrôle qualité.

Ils constituent des actes d'ingénierie accomplis dans le but d'obtenir une plus grande qualité de ces documents et par conséquent ne peuvent être effectués que par un ingénieur en règle. L'ingénieur qui effectue ces types de vérification n'est pas considéré comme l'auteur de ces documents. Ces types de vérification n'exercent donc aucune influence significative sur la prise de responsabilité des documents d'ingénierie par l'ingénieur. Seule la vérification des documents d'ingénierie par l'ingénieur auteur de documents d'ingénierie exerce une influence significative dans la prise de responsabilité professionnelle de ceux-ci. Cependant, nous n'avons pas été en mesure de trouver une définition de vérification donnée comme telle dans le guide de l'OIQ. L'OIQ ne donne aucune indication sur la façon de procéder ni sur la description des activités qui compose les processus de vérification. L'OIQ donne ses recommandations sur le processus de vérification selon les circonstances et le type de demande de vérification. L'ingénieur doit vérifier ses documents d'ingénierie au cours du déroulement du processus de conception. Dans le cadre d'une DSI (direction et surveillance immédiate) ou de la supervision des activités d'ingénierie, la vérification après coup est proscrite et considérée comme une faute professionnelle fortement répréhensible.

L'APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (2020) donne une définition de validation qui permet de donner du sens à ce terme. Cependant, seul l'OIQ émet des recommandations explicites sur le déroulement du processus de validation des documents d'ingénierie. Ces recommandations ne permettent pas de décrire les séquences de tâches à accomplir. Les types de documents concernés, les intervenants impliqués dans le processus ne sont pas clairement indiqués. Il revient donc à l'ingénieur d'élaborer son propre processus de validation de ses documents d'ingénierie. L'OIQ recommande la série de la norme 9000 pour le management de la qualité.

4.7 Analyse et discussion des résultats de la revue en ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

La revue de la conception ou la revue de documents d'ingénierie désigne l'étape qui vient après la modélisation et qui englobe les activités d'évaluation des exigences, de validation du modèle

et de vérification de résultats. La revue des documents d'ingénierie doit être effectuée avant leurs transmissions pour exploitation à des fins de construction.

Selon l'EGBC, la revue de documents d'ingénierie dépend du niveau de risque pour le public que représentent les travaux d'ingénierie. Si le niveau de risque pour la sécurité du public est élevé, une revue indépendante des documents d'ingénierie est requise. Cependant, la Liste de vérification que fournit l'EGBC ne représente qu'un minimum requis et chaque ingénieur ou entreprise doit avoir un plan de management de la qualité basé sur les recommandations de l'EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia (2021b).

L'OIQ affirme que la revue est une activité de coordination de la conception lorsque plusieurs spécialités participent à la conception d'un ouvrage en construction. Un rapport est envoyé à chaque domaine avec des commentaires et suggestions des erreurs et omissions à corriger. La revue des documents d'ingénierie est une activité d'affinement et non une activité créatrice, de plus elle n'est pas exécutée par l'auteur des documents d'ingénierie. Cependant, c'est une source complémentaire à la vérification et la validation de documents d'ingénierie effectuée par l'auteur de ces derniers, car la revue permet d'affiner ces documents d'ingénierie et d'accroître la confiance de l'ingénieur en eux. Toutefois, pour implémenter dans son organisation un processus rigoureux, l'ingénieur doit par ses propres moyens concevoir des façons de procéder qui respectent les exigences minimales de l'OIQ.

4.8 Analyse et discussion des résultats de l'authentification des documents d'ingénierie selon les organismes de réglementation du génie

Au Canada, chacun des douze organismes de réglementation du génie détient ses propres instructions que les membres doivent respecter lors de l'authentification des documents d'ingénierie. La plupart de ces instructions contiennent les définitions des termes, les situations dans lesquelles l'authentification est exigée ou non et les différents types d'authentification requis en fonction de chaque situation.

Dans le contexte québécois, l'ingénieur a l'obligation d'apposer sa signature et son sceau d'ingénieur sur chaque page de plans et sur les pages de garde de devis qu'il a produits lui-même ou qui l'ont été sous sa direction et supervision immédiate. Il doit aussi apposer sa signature sur tous les autres documents d'ingénierie qu'il a produits lui-même ou qui l'ont été sous sa direction et supervision immédiate. Ces activités d'apposition de signature et de sceau le cas échéant sont considérées par l'OIQ comme de l'authentification de documents d'ingénierie. Toutefois, la non-authentification de documents d'ingénierie ne désengage pas un ingénieur de ses responsabilités. La raison d'être première de l'authentification est de lier l'auteur des documents d'ingénierie authentifiés de façon irréfutable à ceux-ci afin d'attester que ces documents ont été produits par un ingénieur et qu'ils sont par conséquent complets, exhaustifs et sans ambiguïté. Au Québec, faire circuler des documents d'ingénierie non authentifiés à l'extérieur de l'équipe de conception hors de l'organisation est illégal et, évidemment, l'utilisation de documents d'ingénierie non authentifiés sur un chantier de construction est aussi illégale. L'authentification est le dernier geste qu'un ingénieur doit poser sur un document d'ingénierie, ce qui veut dire que la vérification et la validation finale de la conception sont les gestes qui précèdent l'authentification. Cependant, aucun document ne vient préciser de façon formelle quelles actions un ingénieur devrait entreprendre avant d'authentifier ses documents d'ingénierie.

4.9 Analyse et discussion des entrevues semi-dirigées

Cette section débute par les entrevues avec les ingénieurs et se termine avec celles effectuées avec les professeurs de génie civil. Une analyse croisée des données recueillies est privilégiée dans cette section pour faciliter la compréhension des concepts évoqués et l'émergence des idées recherchées.

4.9.1 Entrevues avec les ingénieurs

Lors des entrevues, différents aspects des processus de vérification et de validation ont été abordés en insistant sur le déroulement de ces processus. Les questions ci-dessous représentent une synthèse de l'ensemble de celles abordées lors des entrevues.

- Qu'elles sont les activités qui précèdent l'authentification de documents d'ingénierie ?
- Pouvez-vous nous faire le récit de la vérification et de la validation de documents d'ingénierie ?
- Pouvez-vous nous fournir ou nous dire comment obtenir des documents qui montrent comment se déroule le processus de vérification et de validation ?
- Est-il possible de suivre l'entièreté du déroulement des processus de vérification et de validation dans le cadre d'une recherche ?

Tous les ingénieurs interviewés étaient affirmatifs sur le fait que la validation est l'activité qui précède l'authentification de documents d'ingénierie. Cependant, l'ingénieur 3 précise que le processus de vérification et de validation fait partie des activités que l'ingénieur effectue au quotidien et, par conséquent, à l'étape de l'authentification l'ingénieur a déjà effectué sa vérification et validation des documents d'ingénierie. Tous les ingénieurs ont émis l'idée que la phase de vérification et de validation avant l'authentification est sommaire et relativement brève. Parmi les outils nécessaires pour le déroulement du processus de vérification, les ingénieurs interviewés ont cité la Liste de vérification. Il faut noter cependant que cet outil est rarement utilisé et qu'aucun des ingénieurs passés en entrevue n'a affirmé l'avoir déjà utilisé.

Tous les ingénieurs ont affirmé que les processus de vérification et de validation étaient nécessaires et devraient être exécutés tout au long du projet et non seulement à une étape précise. Ceci implique que pour suivre le processus de vérification et de validation, il peut être nécessaire d'envisager la possibilité de suivre l'entièreté des activités de conception d'un projet mené par un ingénieur. Ce qui reviendrait à observer l'entièreté du travail de l'ingénieur à temps plein sur un projet donné. C'est pourquoi l'ingénieur 3 pense que c'est impossible de faire des observations sur le processus de vérification et de validation de documents d'ingénieur sans avoir à suivre constamment le travail de l'ingénieur. Cependant, il faut noter que la vérification et la validation en cours de conception ne devraient pas remplacer ou exempter de la vérification, de la validation et de la revue des livrables par leurs auteurs avant leur transmission pour utilisation.

Les ingénieurs interviewés ont affirmé ne pas posséder ni savoir où se procurer les documents de référence qui expliquent comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil. Ces affirmations unanimes sur la non-disponibilité/non-accessibilité des guides de vérification et de validation de documents d'ingénierie, la non-disponibilité/non-accessibilité des Liste de vérifications indispensables pour l'élaboration et l'application des processus de vérification et de validation des documents d'ingénierie amènent à se demander si ces processus ne feraient pas partie de la connaissance tacite.

4.9.2 Entrevues avec les professeurs

En guise de rappels, les entrevues avec les professeurs avaient pour objectif d'infirmer ou de confirmer les résultats de ce projet. Il fallait confirmer ou infirmer que :

- le processus de vérification et de validation est peu documenté dans l'industrie de la construction ;
- les sources de données disponibles ont été amplement explorées sans en omettre certaines ;
- les raisons qui, selon eux, expliquent les faits que nous avons constatés.

Les deux professeurs arrivent à la même conclusion que les processus de vérification et de validation des documents d'ingénierie sont peu documentés dans l'industrie de la construction. Il est rare de documenter les façons de faire dans l'industrie de la construction à cause de certaines particularités du domaine. La complexité et le fait que chaque projet de construction est unique font en sorte qu'il est souvent difficile de prévoir les façons de les concevoir.

Le phénomène de la fragmentation dans l'industrie de la construction est cité comme un frein au développement de ces processus. En général, dans le secteur industriel, un produit est développé et affiné afin d'être compétitif sur le marché pour un potentiel client. Dans ce cas, les exigences sont spécifiées et évaluées lors de l'initialisation du projet et des prototypes sont généralement conçus et testés jusqu'à satisfaction avant la production. Cependant, en

construction, selon l'OIQ, il existe plusieurs modes de réalisation de projet pour lesquels les responsabilités des divers intervenants peuvent varier. Un projet de construction prend naissance seulement suite à l'expression des besoins ou exigences du client⁶ ou "maître d'ouvrage" ou "donneur d'ouvrage assisté du maître d'œuvre"⁷. Contrairement à un produit industriel, les exigences du maître d'ouvrage ne sont généralement pas toujours spécifiées. De plus, ces exigences sont souvent interprétées et spécifiées par le maître d'œuvre au profit des ingénieurs affectés au projet. Comme spécifié plus haut, tous ces intervenants ont des responsabilités variées et, par conséquent, cette fragmentation est un obstacle au déploiement des efforts communs pour le développement des processus tant en phase de conception qu'en phase de réalisation. En général, Les firmes de génie-conseil jouent le rôle-conseil auprès de leurs clients. Toutefois, ce sont des entreprises qui se doivent de générer les revenus et de ce fait doivent avoir une certaine compétitivité. Cette situation fait en sorte que les processus développés par ces entreprises sont souvent classés confidentiels dans le but de préserver leur compétitivité sur le marché. Cette situation est accentuée par le phénomène de la fragmentation (non-partage de responsabilité) dans le domaine, où le client participe très peu ou presque pas à l'amélioration des pratiques en génie.

4.10 Les limites de la recherche

La sélection des praticiens interviewés a été faite au sein d'une même entreprise. Cette situation en est ainsi en raison de la nature du partenaire industriel associé au projet qui demande qu'on

⁶ **Le maître d'ouvrage**, souvent appelé donneur d'ouvrage, client ou propriétaire, est celui qui lance un projet en déterminant ses besoins et en choisissant le mode de réalisation qu'il entend utiliser pour exécuter le projet. Il a généralement un rôle administratif.

⁷ **Le maître d'œuvre** est défini ainsi par la Loi sur la santé et la sécurité du travail (art.1) : « Le propriétaire ou la personne qui, sur un chantier de construction, a la responsabilité de l'exécution de l'ensemble des travaux ».

étudie sa propre situation. Un biais de sélection est possible à cause du fait que chaque entreprise en construction a ses propres objectifs et ses pratiques spécifiques. Cela a été de même pour les entrevues avec les professeurs, car ces derniers faisaient partir d'une même école d'ingénierie.

Les activités de ce projet ont été effectuées dans le contexte de la pandémie de la COVID-19. La présente recherche a été adaptée à cette réalité : les entrevues et le suivi des activités de recherche ont été réalisés entièrement à distance. L'impact des moyens utilisés n'a pas pu être mesuré en ce qui concerne la communication avec les participants aux entrevues et du type d'entrevue à distance sur la qualité des réponses obtenues.

La stratégie utilisée pour la sélection des documents professionnels a peut-être été biaisée. La recherche en ligne a été utilisée dans les différentes bases de données pour tous les cas de documents et les plans de cours. En raison du fait que le télétravail était privilégié, il était presque impossible de visiter certains organismes comme l'OIQ pour une entrevue sur l'existence de certains types de documents en lien avec la vérification et la validation de documents d'ingénierie. Il est donc raisonnable de conclure que ces biais aient eu une faible influence sur nos résultats.

CONCLUSION

La vérification et la validation de documents d'ingénierie sont des moyens incontournables qui permettent à l'ingénieur de s'assurer que ses livrables répondent aux exigences prévues et que les solutions proposées sont économiquement viables et qu'elles combleront les besoins exprimés par le client. Toutefois, il arrive que certains ingénieurs éprouvent de l'inconfort à vérifier, valider et authentifier leurs documents d'ingénierie, car le périmètre de la vérification et de la validation de documents d'ingénierie semblent flous, et que les façons de mener un processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie semblent ne pas être définies. L'objectif principal de cette recherche était de recenser à travers la littérature scientifique, la littérature professionnelle et les normes de l'industrie de la construction, des façons de faire qui montrent comment se déroule le processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie. La méthodologie de recherche exploratoire a été retenue pour mener les activités de ce projet de recherche. La question principale de la recherche était "Comment se déroulent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil ?" Cette question a été traitée sur la base de trois sous-questions dont voici la première : "Quelle définition la littérature donne-t-elle de la vérification et de la validation ?"

Dans la littérature scientifique, la vérification et la validation sont définies de différentes façons. Selon Maropoulos et Ceglarek (2010b), Gomez et al. (2014), Karkasinas et Rentizelas (2019), la vérification est un processus de contrôle qualité utilisé pour évaluer si un produit, un service ou un système est conforme ou non aux réglementations, spécifications ou conditions imposées au début d'un projet. D'autre part, la validation est un processus d'assurance qualité consistant à établir des preuves qui fournissent un degré élevé d'assurance qu'un produit, un service ou un système répond aux exigences d'utilisation prévues. Les définitions trouvées dans leurs contextes respectifs ne concordent pas toujours avec les définitions en provenance des normes dont certaines semblent tirer leur origine de l'ISO 9000.

La norme ISO 9001:2015 définit la vérification comme la confirmation par des preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites (3.8.12) tandis que la validation est définie comme la confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites (3.8.12). Gomez et al. (2014) énoncent que le processus de vérification répond à la question : *Are we making the product right?* Tandis que celle du processus de validation répond à la question : *Are we making the right product?* Cette définition permet de noter la différence entre la vérification et la validation.

La deuxième sous-question était : "En quoi consistent les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction ?" La tentative de découvrir comment se déroule les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans un contexte traditionnel s'est avérée peu fructueuse. Cependant, l'exemple type de vérification et de validation de documents d'ingénierie trouvés dans la littérature scientifique dans un contexte BIM est le "BIM-base model checking". Selon Acampa et al. (2019), le "BMC" est un processus peu défini dans le contexte BIM et selon Dimyadi et al. (2016), le "BMC" est un processus de vérification de contenu BIM et de l'information qui y est associée pour une utilisation spécifiée. Plusieurs expressions sont utilisées pour désigner les différents types de validation BIM, cependant Hjelseth (2015) précise que bon nombre de ces termes sont des synonymes. Certains auteurs comme Acampa et al. (2019), Dimyadi et al. (2016), Hjelseth (2015), Seiß (2019) et Makisha (2019) affirment que le "*model checking*" se subdivise en au moins trois activités principales : La validation BIM ou la validation de contenu, la détection d'interférence et le "code checking".

Toutefois, les recherches sur les types de vérification et de validation de modèle numérique sont dépendantes du secteur de développement logiciel comme celui de l'AEC collection d'Autodesk. Peu de recherches sont effectuées dans l'industrie de la construction sur la façon d'utiliser ces outils pour effectuer les processus de vérification et la validation de documents d'ingénierie. Certains outils tels que la liste de contrôle devraient être utilisés pour guider l'exécution de processus de vérification et la validation.

Les normes de l'industrie et le guide de pratiques professionnelles de l'OIQ émettent des recommandations qui sont génériques et ont pour avantages d'être adaptables à différentes situations indépendamment du domaine du génie. Cependant, elles ne permettent pas de décrire ce que sont les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie et quelles en sont les grandes étapes. Les trois types de vérification de documents d'ingénierie que recommande l'OIQ ne concernent pas la vérification de documents d'ingénierie par son auteur et, par conséquent, n'aident pas à répondre à la question de la recherche. Dans un contexte BIM, la norme ISO 19650-2:2015(Fr) et le Manuel de pratique canadienne pour la MDB émettent des instructions et des illustrations de haut niveau permettant l'élaboration de processus de conception et des activités de contrôle pour la validation des modèles BIM.

En ce qui concerne la troisième et dernière sous-question, "En quoi consiste l'authentification de documents d'ingénierie?" Chaque organisme de réglementation du génie émet des recommandations à ce sujet à l'intention de leurs membres. Dans le contexte québécois, l'OIQ définit l'authentification comme l'acte ultime que l'ingénieur pose sur ses documents d'ingénierie dans le but de les identifier formellement et de façon irréfutable comme siens. Cet acte démontre que les documents authentifiés ont été produits par un membre en règle de l'OIQ. Il est illégal d'utiliser des documents d'ingénierie non authentifiés sur un chantier de construction au Québec. Toutefois, la non-authentification d'un document d'ingénierie ne désengage pas son auteur de ses responsabilités en tant qu'ingénieur.

La contribution de cette recherche a permis de recenser les écrits et les sources pertinentes qui aident à établir les définitions des termes vérification et validation dans l'industrie de la construction, et à identifier les sources d'information utiles pour l'implémentation des activités de contrôles de documents d'ingénierie dans l'industrie de la construction. Cette recherche a aussi permis de recenser les différents processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie actuellement proposés dans l'industrie de la construction. En effet, cette recherche présente les possibilités, les limites et quelques freins aux développements des activités de contrôle dans un contexte BIM actuellement proposés dans l'industrie de la construction.

La méthodologie de la recherche exploratoire choisie permet de poser les bases pour une recherche future sur le sujet étudié et non d'aboutir à une généralisation. Afin de vérifier la possibilité de généraliser les types de vérification et de validation identifiés dans cette recherche, l'hypothèse selon laquelle les processus de vérification et de validation font partie des connaissances tacites peut être émise. Une étude future devra alors déterminer les moyens de capturer les connaissances mises en œuvre pour mener les processus de vérification et de validation afin de les formaliser pour une utilisation optimale dans l'industrie de la construction.

RECOMMANDATIONS

Cette recherche exploratoire permet de jeter les bases d'une question de recherche à explorer pour l'avenir afin de mener des recherches plus approfondies le cas échéant. Cela étant, ce projet a permis de faire plusieurs constats qui suscitent des questionnements :

- Très peu de littérature scientifique traite le sujet concernant le processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie en génie civil;
- Plusieurs avancées sont menées dans le domaine du numérique, en particulier le développement de processus de vérification et de validation dans un contexte BIM. Cependant, nous avons constaté que la littérature scientifique décrit peu le déroulement des processus de vérification et de validation dans ce contexte;
- Aucune source ne permet d'obtenir des documents qui décrivent sommairement ou en détail les étapes d'un processus type de vérification et la validation de documents d'ingénierie. Même si des exemples de validation de modèles BIM ont été trouvés, ces exemples sont souvent incomplets et aucune preuve de leur fiabilité n'est disponible. La Liste de vérification a été citée par les ingénieurs comme un outil utile pour la validation de documents d'ingénierie dans un contexte BIM. Cependant, tous les ingénieurs ont affirmé n'avoir jamais vu et évidemment pu se servir d'un tel outil. Peu de documents trouvés font mention de cette fameuse Liste de vérification.

Dans une recherche future, on pourrait poser l'hypothèse que les connaissances requises pour effectuer les processus de vérification et de validation font partie de la connaissance tacite. L'étude pourra aider à développer une stratégie permettant de les capturer afin de les formaliser en vue d'une meilleure application dans l'industrie de la construction.

L'uniformisation des termes et expressions utilisés pour désigner les processus de vérification et de validation est un frein pour le développement de ces processus. Les termes et expressions

couramment utilisés dans la littérature scientifique et les guides de pratiques semblent créer une certaine confusion. Nous suggérons dans une recherche future l'étude d'uniformisation de termes utilisés pour désigner les processus de vérification et de validation de documents d'ingénierie dans un contexte BIM.

Les logiciels utilisés dans le cadre des activités de contrôle des modèles numériques sont fortement influencés par le secteur commercial et certains résultats montrent que l'ingénieur a une action limitée sur la manipulation du logiciel lorsqu'il faut exécuter une tâche dont la commande n'est pas définie par le commerçant. Dans une recherche future, il pourrait être étudié la possibilité d'apporter des ajouts et des modifications aux fonctionnalités de certains de ces logiciels par l'ingénieur sans avoir recourt au service du commerçant.

ANNEXE I

DÉCISION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE



Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure

Le 23 février 2022

Titre de l'activité : Défis de la prise de responsabilité face à la donnée numérique : transition vers les signatures numériques et investigation de la charge cognitive associée

Responsable : James Lapalme, Professeur au département de génie des systèmes – École de technologie supérieure (ÉTS)

Étudiant: Isodore Tamo, étudiant à la maîtrise – ÉTS

Référence : H20220202

DÉCISION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE

Monsieur Lapalme,

Vous avez soumis au Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'ÉTS le formulaire de présentation de l'activité mentionnée en rubrique. Ce formulaire a été évalué le 23 février 2022 en comité délégué.

Dans un premier temps, le comité prend acte de l'historique du projet et du fait que certaines activités ont déjà été réalisées. Selon les informations contenues dans le Formulaire de présentation, et considérant l'Article 2.5 de l'Énoncé de politique des trois Conseils – Éthique de la recherche avec des êtres humains (ÉPTC2), le comité a conclu que l'activité présentée vise l'amélioration des processus et qu'elle ne répond pas à la définition de recherche avec des participants telle que définie par l'ÉPTC2. Par conséquent, une évaluation éthique et un suivi continu de la part du CÉR ne sont pas requis.

Veuillez noter que cette décision repose sur les informations présentées. Si vous devez apporter des modifications aux objectifs de l'activité, veuillez en informer le CÉR dans les meilleurs délais.

Veuillez également noter qu'indépendamment de cette décision, les principes de conduite responsable en recherche s'appliquent à votre activité. Vous êtes donc tenu de vous y conformer.

Veuillez agréer, Monsieur Lapalme, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Mathias Glaus, Ing., Ph.D.

Président, Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure

ANNEXE II

PHASE DE RÉALISATION DES ACTIFS

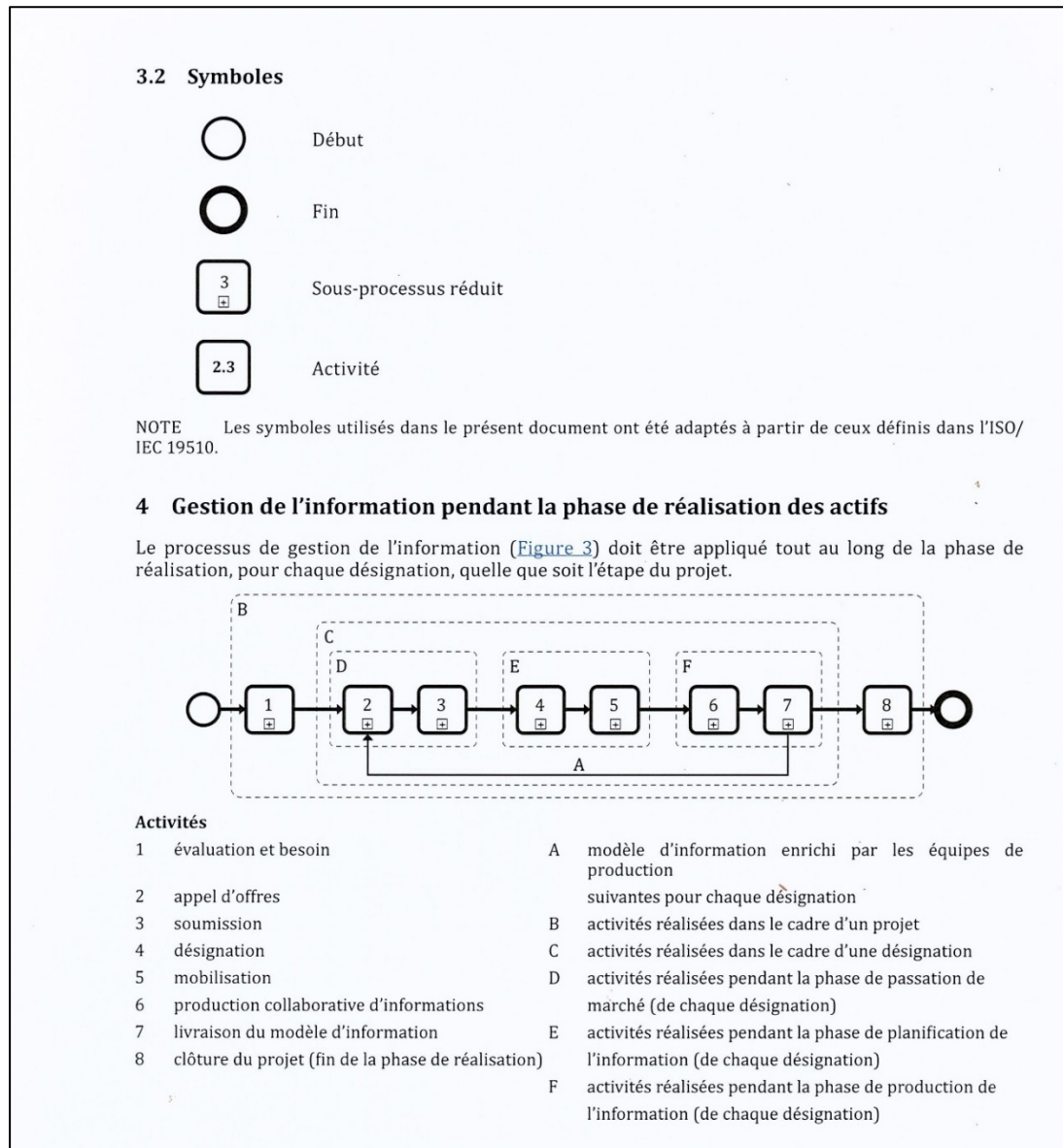


Figure-A II.1 Processus de gestion de l'information pendant la phase de réalisation des actifs
Tirée de l'ISO - Organisation internationale de normalisation (2018)

ANNEXE III

PRODUCTION COLLABORATIVE DE L'INFORMATION

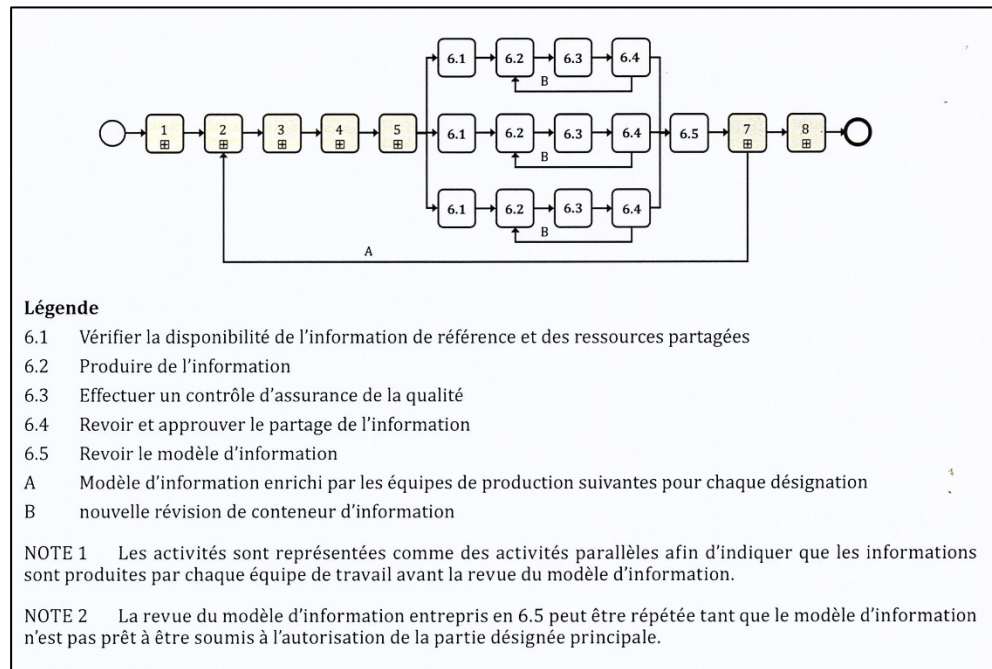


Figure-A III-1 production collaborative de l'information
Tirée de l'ISO - Organisation internationale de normalisation (2018)

ANNEXE IV

LIVRAISON DU MODÈLE D'INFORMATION

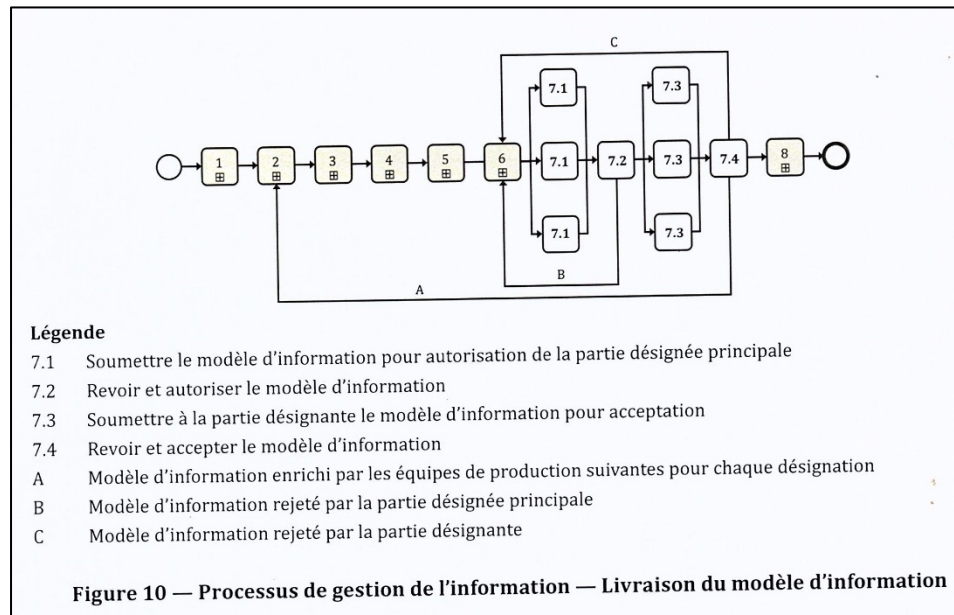


Figure-A IV-1 Livraison du modèle d'information
Tirée de l'ISO - Organisation internationale de normalisation (2018)

Questions de l'entrevue semi-dirigée

- 1- En quoi consiste le processus de validation d'un plan ou d'une maquette numérique qui précède la décision de signer et d'apposer le sceau de l'ingénieur chez le partenaire industriel ?**
 - Pour un projet donné et pour votre spécialité, est-ce qu'il y a plus d'un ingénieur d'impliqué dans le processus de validation ?
 - Quelle peut être la durée du processus de validation ?
 - Combien d'étapes sont généralement nécessaires pour procéder à la validation d'un plan papier ou d'une maquette numérique ?
 - Combien de personnes (ingénieurs ou non) sont impliquées dans le processus de la validation et comment se déroule la collaboration ?
 - Quels sont les différents types de documents nécessaires au processus de la validation d'un plan ou d'une maquette numérique ?
 - Est-ce que l'effort de validation se répartit en plusieurs étapes imbriquées dans le processus de conception ?

- 2- Quel est l'environnement de travail de l'ingénieur chez le partenaire industriel en ce temps de pandémie et la possibilité d'observer un ingénieur pendant le travail de validation ?**
 - Comment est organisé l'environnement physique de travail de l'ingénieur (Télétravail, présentiel, possibilité d'installer des caméras pour les observations) ?
 - Quels sont les logiciels utilisés pour la validation et y a-t-il la possibilité d'installer des logiciels de collectes de données aux fins de la recherche sur le poste informatique de l'ingénieur ?
 - Est-ce possible de réunir le participant et l'observateur dans la même pièce lors du travail de l'ingénieur ?

- 3- Quels sont les enjeux que vous pouvez relever si l'ingénieur était observé pendant qu'il effectue le processus de validation ?**
 - Est-il envisageable d'observer le processus complet de la Validation ?

- Seriez-vous en mesure de faire le récit de la dernière fois où vous avez validé des documents en vue de les signer ?
- Combien de temps devrions-nous prévoir pour cela ?

ANNEXE V

QUESTIONNAIRE DE L'ENTREVUE AVEC LES INGÉNIEURS

ANNEXE VI

QUESTIONNAIRE DE L'ENTREVUE AVEC LES PROFESSEURS

Mise en contexte :

Dans le cadre de notre projet de recherche, nous avons tenté d'identifier des cadres, des méthodes ou des pratiques explicites qui montrent comment se déroule le processus de validation de documents d'ingénierie en génie de la construction dans le but de prendre la responsabilité professionnelle.

Pour identifier ces cadres, ces méthodes et ces pratiques explicites, nous avons fait une analyse de la littérature scientifique, nous avons constaté les documents de référence proposés à l'ÉTS dans les cours en lien avec notre projet et nous avons fait des entrevues semi-dirigées avec un partenaire industriel.

Pour l'instant, notre constat est qu'il n'existe pas des cadres, des méthodes ou des pratiques explicites pour faire la validation des documents d'ingénierie.

Dans ce contexte, voici nos questions pour vous :

1. Selon vous, est-ce que notre constat est erroné ? Pourquoi ?
2. Si notre constat n'est pas erroné, selon vous, qu'est-ce qui explique la situation considérant l'importance de la validation pour la responsabilité professionnelle ?
3. Si notre constat est erroné, selon vous, où pourrions-nous trouver ces cadres, ces méthodes ou ces pratiques explicites ?

ANNEXE VII

ORGANISMES DE RÉGLEMENTATION DU GÉNIE AU CANADA

Tableau-A VII-1 Les organismes de réglementation du génie au Canada

Territoire	Nom organisme et acronyme	Guide de pratiques professionnelles
Québec	Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ)	<ul style="list-style-type: none"> - 6 Guides de formation en conception (Génie chimique; génie civil ; génie industriel; génie mécanique; génie robotique; Génie électrique) - Guide de pratique professionnelle
Ontario	Professional Engineers Ontario (PEO)	<ul style="list-style-type: none"> - Conducting a Practice Review - Professional Engineering Practice Guideline
Manitoba	Engineers Geoscientists Manitoba (EGM)	
Saskatchewan	APEGS	
Colombie-Britannique	Engineers and Geoscientists British Columbia (EGBC)	<ul style="list-style-type: none"> - Many Guides to the Standard for Documented Independent Review of... - Guide to the Standard for the Authentication of Documents (v3.0 February 17, 2021) - Guide to the Standard for the Use of Professional Practice Guidelines (v1.1 May 20, 2021)
Alberta	APEGA	Practice Guidelines and other small guides
Nouveau-Brunswick	Association des ingénieurs professionnels et géoscientifiques du Nouveau-Brunswick (AIGNB)	
Nouvelle-Écosse	Engineers Nova Scotia	<ul style="list-style-type: none"> - Field reviews, construction deficiencies & safety - Professional practice guidelines
Île-du-Prince-Édouard	Association of Professional Engineers of Prince Edward Island (PEI)	Professional development manual for compliance.
Yukon	Engineers Yukon	
Territoires du Nord-Ouest et Nunavut	Northwest Territories and Nunavut Association of Professional Engineers and Geoscientists (NAPEG)	

Terre-Neuve-et-Labrador	Professional Engineers and Geoscientists of Newfoundland and Labrador (PEGNL)	<ul style="list-style-type: none">- Guideline For Drawings & Specifications- Guidelines for Design and Construction of “Steel Building Systems”
-------------------------	---	--

ANNEXE VIII

LISTE CONSULTÉE DES ÉCOLES D'INGÉNIEUR DU QUÉBEC

Tableau-A VIII-1 Liste des écoles d'ingénieur du Québec qui enseigne le génie civil

#	Noms des écoles d'ingénierie	Dispense au moins un cours en lien avec la validation
1	Université McGill	Non
2	Polytechnique Montréal	Oui
3	Université Concordia	Non
4	L'École de Technologie supérieure (ÉTS)	Oui
5	L'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)	Non
6	L'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)	Non
7	L'Université du Québec à Rimouski (UQAR)	Non
8	L'Université du Québec en Outaouais (UQO)	Non
9	L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)	Non
10	Université Laval	Non
11	Université de Sherbrooke (UdeS)	Oui

ANNEXE IX

FLUX DE TRAVAIL DE L'ANALYSE DE L'INGÉNIEUR

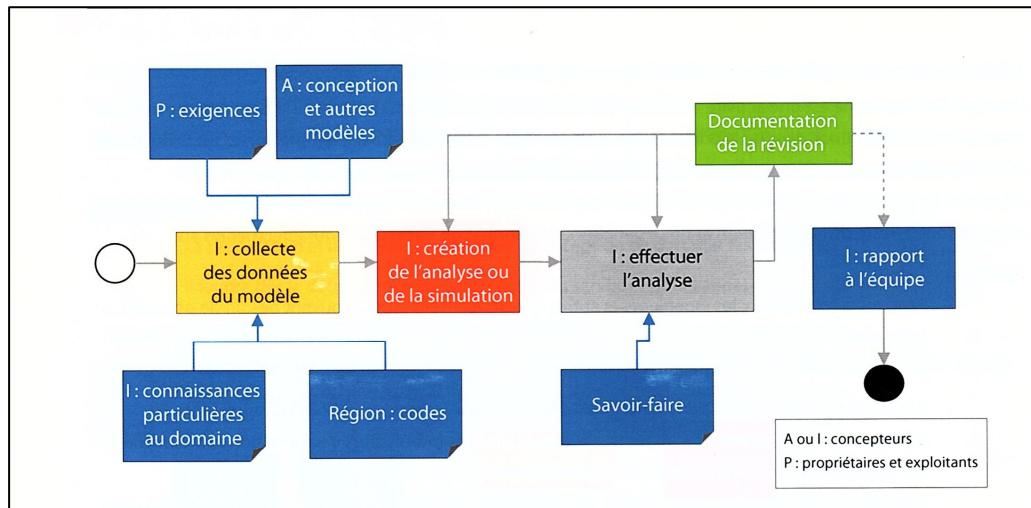


Figure-A IX-1 Flux de travail de l'analyse de l'ingénieur
Tirée de Dickinson, Woodard, Building, et Institut pour la (2016)

ANNEXE X

GLOBAL VERIFICATION/VALIDATION STEP APPROACH

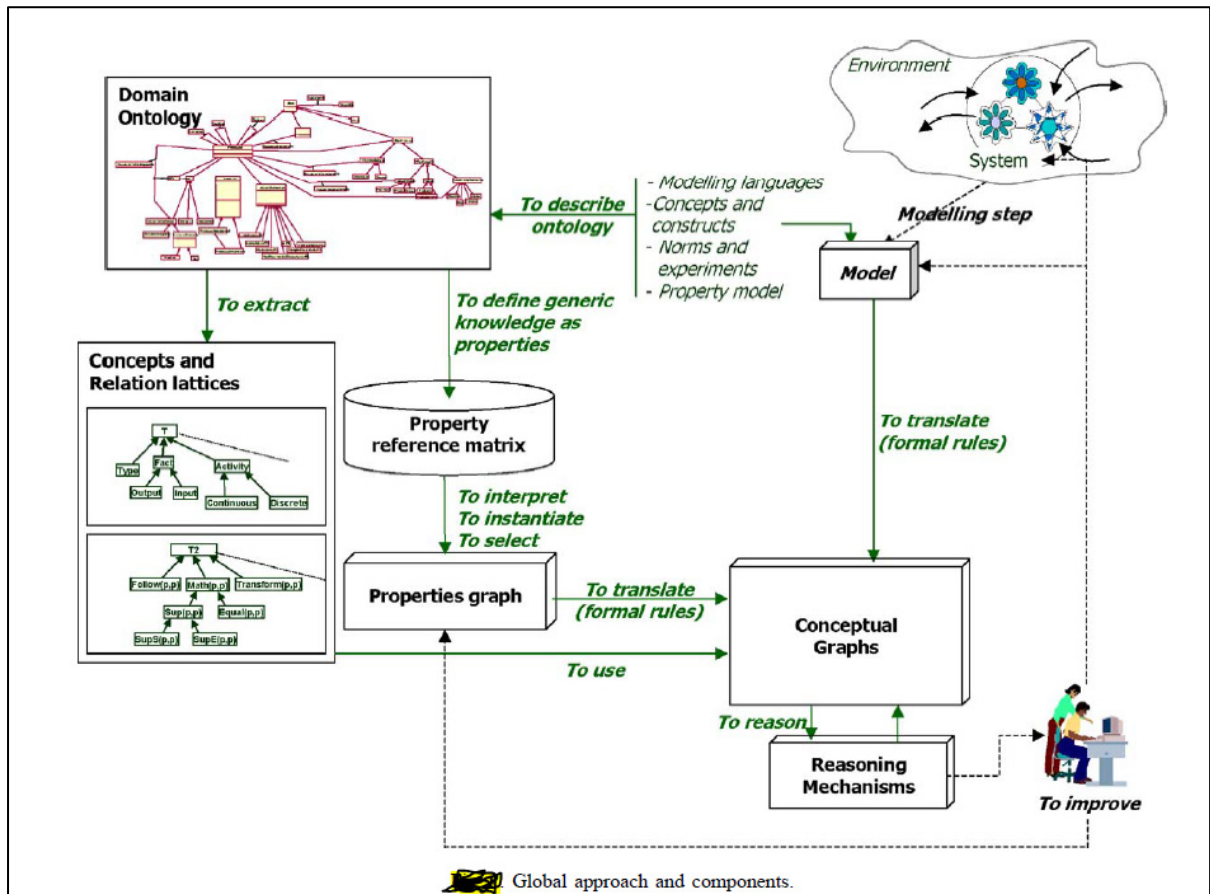


Figure-A X-1 Global Verification/validation step approach
Tirée de Chapurlat et al. (2003)

ANNEXE XI

CLASSIFICATION OF BMC LEVELS

↑ Content of information "I in the BIM" ↑	Specific purpose checking Standard software Adding specified values to existing properties in BIM-objects. Advanced content checking. <p style="text-align: right;"><i>Level 3</i></p>	Integrated model checking Adding values according to specifications in new properties in BIM-objects. Advanced content checking. <p style="text-align: right;"><i>Level 4</i></p>	Pervasive model checking BIM of multiple integrated models Compliance checking with wide scope. Dedicated rule-sets Replace manual checking. <p style="text-align: right;"><i>Level 5</i></p>
	Adjusted model checking Standard software Adding values for existing properties in BIM-objects. <p style="text-align: right;"><i>Level 2</i></p>	Specific purpose checking Compliance checking of specified scopes. Compliance checking of dedicated domains. <p style="text-align: right;"><i>Level 3</i></p>	Integrated model checking Adding new properties and values according to specifications of new BIM-objects. <p style="text-align: right;"><i>Level 4</i></p>
	Clash detection checking Standard software Geometric checking of interference. Default values, no adding of values to properties. Support manual checking <p style="text-align: right;"><i>Level 1</i></p>	Adjusted model checking Standard software Adding values according to specifications in existing properties in BIM-objects. <p style="text-align: right;"><i>Level 2</i></p>	Specific purpose checking Guidance Standard software Adding new properties with values to relevant BIM-objects. <p style="text-align: right;"><i>Level 3</i></p>
	→ Complexity of digital rules →		

Figure-A XI-1 Classification of BMC levels for compliance and content checking
 Tirée de Hjelseth (2015, p. 11)

ANNEXE XII

OVERVIEW OF FUNCTIONS IN BMC SOFTWARE

Software		Functions						
		Solibri Model Checker 2)	Autodesk Navisworks Manager	Bentley Projectwise Navigator	Tekla BIMsight	dRofus Nosyko	Open source BIMserver 4)	Free IFC viewers 5)
<i>Functions</i>	Clash detection	x	x	x	x		x	
	Compliance checking	x				x	x	
	Content checking	x				x	x	
	Search function	x	x	x	x	x	x	x
	Reporting	x	x	x	x	x	x	
	Quantity / information take off	x	x	x		x	x	
	Time liner		x					
	Animations		x					
<i>Exchange formats</i>	Import of BIM file	ifc, dwg	almost all formats	dgn, dwg, pdf, 3)	ifc	ifc	ifc	ifc, dwg, others
	Direct link Revit		x			x		
	Direct link ArchiCAD	x						
	Export of reports	pdf, xls	pdf, html, xls	pdf			ifc, others	
<i>Rule-sets</i>	Separate rule-sets	x				x	x	x
	Modify existing rules	x	x		x	x	x	
	Combing rules to new rule sets	x				x	x	
	Develop new rule sets					x	x	--
<i>Cost</i>	License cost 1)	Pro	Pro	Pro	Free	Pro	Free	Free

Figure-A XII-1 Overview of functions in BMC software
Tirée de Hjelseth (2015, p. 12)

ANNEXE XIII

LISTE DE VÉRIFICATION AND SIGNOFF FOR AN INDEPENDENT REVIEW

[Print clearly and legibly]

RE:

Name of project or work

Address of project or work

PROFESSIONAL OF RECORD

P.Eng. or P.L.Eng. name

Firm name

Permit to Practice number

Address of firm

ITEM	REVIEWED	REMARKS
	INITIALS	
1. Design code loadings and serviceability limits		
2. Material specifications and geotechnical recommendations		
3. Concept and integrity of the gravity load resisting system		
4. Concept and integrity of the lateral load resisting system (e.g., wind, seismic)		
5. Drawing completeness and continuity of load paths		
6. Design check of representative structural elements		
7. Review of representative structural details		
8. Concerns discussed with the Professional of Record		

INDEPENDENT REVIEWER

P.Eng. or P.L.Eng. name

Firm name

Permit to Practice number

Address of firm

Date: (yy/mm/dd)

Signature

ANNEXE XIV

EXAMPLE OF CLASH DETECTION

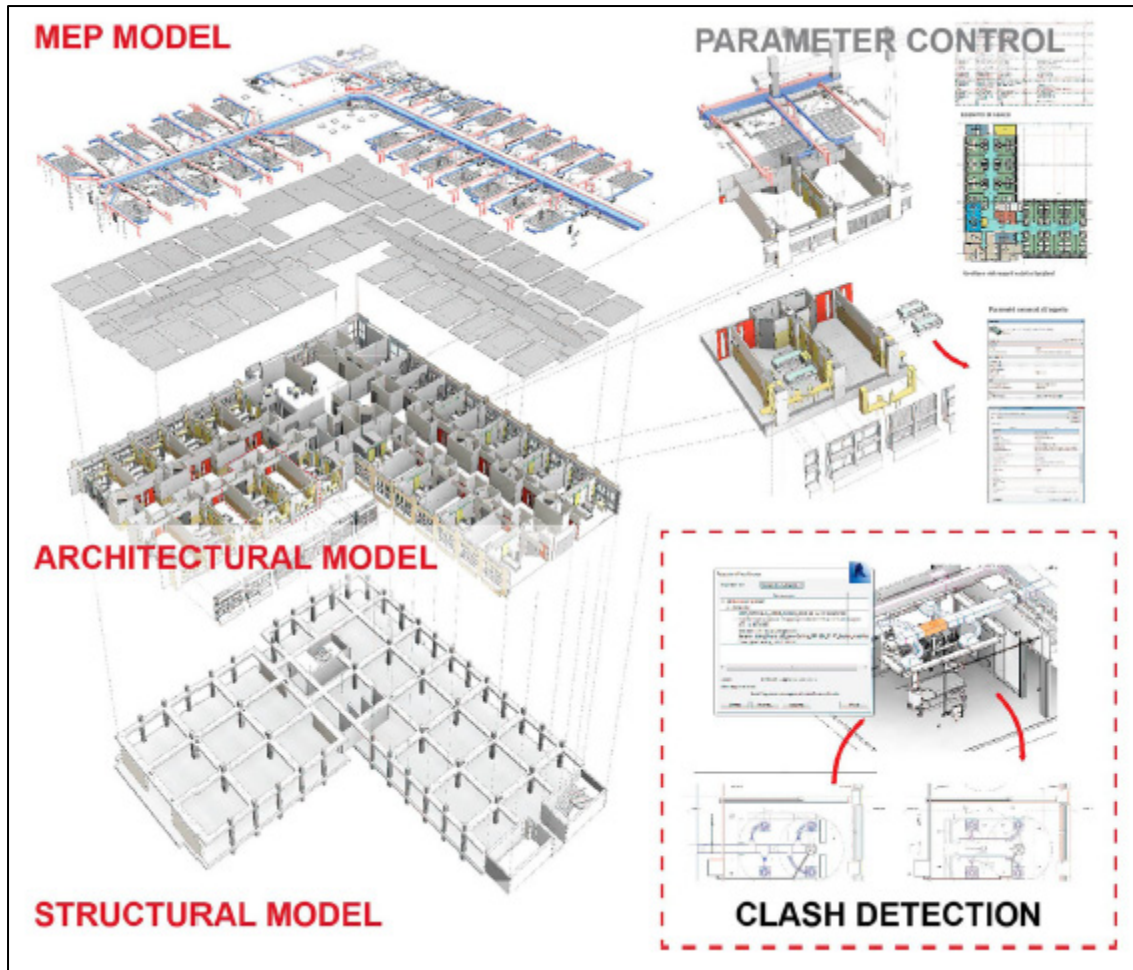


Figure-A XIV-1 Clash detection example
Tirée de Donato et al. (2018, p. 14)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acampa, G., Marino, G., & Ticali, D. (2019). Validation of infrastructures through BIM. *AIP Conference Proceedings*, 2186(1), 160011. doi: 10.1063/1.5138079. Repéré à <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5138079>
- Alexandre, M. (2013). La rigueur scientifique du dispositif méthodologique d'une étude de cas multiple. *Recherches Qualitatives*, 32, 26. doi: 10.7202/1084611ar
- AMICE, E. C. (1993). *CIMOSA: Open System Architecture for CIM*. Springer Berlin Heidelberg. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=LOZjQgAACAAJ>
- Andrich, W., Daniotti, B., Pavan, A., & Mirarchi, C. (2022). Check and Validation of Building Information Models in Detailed Design Phase: A Check Flow to Pave the Way for BIM Based Renovation and Construction Processes. *Buildings*, 12(2). doi: 10.3390/buildings12020154. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124046112&doi=10.3390%2fbuildings12020154&partnerID=40&md5=2e8a7b75ea4358fe2b88077c6017714c>
- APEGA - Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta. (2020). Document Authentication. Repéré le 2022/12/16 à <https://www.apega.ca/members/document-authentication>
- Arayici, Y., Egbu, C., & Coates, S. (2012). Building information modelling (BIM) implementation and remote construction projects: issues, challenges, and critiques. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 17.
- Ayerbe, C., & Missonier, A. (2007). Validité interne et validité externe de l'étude de cas : principes et mise en œuvre pour un renforcement mutuel. *Revue Finance Contrôle Stratégie*, 10, 37-62.
- Bahill, A. T., & Henderson, S. (2005). Requirements Development, Verification, and Validation exhibited in famous failures. *Systems Engineering*, 8, 1-14. doi: 10.1002/sys.20017

- Ben-Daoud, M. (2016). *Réussir votre projet de recherche: méthodologie, motivation et guide pratique*.
- Bernus, P. (1999). *GERAM: Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology IFIP-IFAC Task Force on Architectures for Enterprise Integration*. doi: 10.13140/RG.2.2.35937.33120
- Bernus, P., Mertins, K., & Schmidt, G. (1998). Architectures of Information Systems. Dans P. Bernus, K. Mertins & G. Schmidt (Éds.), *Handbook on Architectures of Information Systems* (pp. 1-9). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-03526-9_1. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-662-03526-9_1
- Bubshait, A. A., & Al-Atiq, T. H. (1999). ISO 9000 quality standards in construction. *Journal of Management in Engineering*, 15(6), 41-46. doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(1999)15:6(41). Repéré à [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1999\)15:6\(41\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1999)15:6(41))
- Chapurlat, V., Kamsu-Foguem, B., & Prunet, F. (2003). Enterprise model verification and validation: An approach. *Annual Reviews in Control*, 27 II(2), 185-197. doi: 10.1016/j.arcontrol.2003.08.001. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1642475435&doi=10.1016%2fj.arcontrol.2003.08.001&partnerID=40&md5=9ffe835addb582a2a1c5538b266b66ad>
- Chen, D., Vallespir, B., & Doumeingts, G. (2002). Designing manufacturing systems: Contribution to the development of an enterprise engineering method. Dans.
- Chen, D., & Vernadat, F. (2001). Standardisation on Enterprise Modelling and Integration: Achievements, On-Going Works and Future Perspectives. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(17), 51-56. doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33255-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33255-X). Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701733255X>
- Chorafas, D. N. (2002). *Enterprise architecture and new generation information systems, information technology*. St. Lucie Press.

- Ciribini, A., Mastrolembo Ventura, S., & Bolpagni, M. (2016). Informative content validation is the key to success in a BIM-based project. *Territorio Italia - Governo del Territorio, Catasto, Mercato immobiliare, 2-2015*, 9-30. doi: 10.14609/Ti_2_15_1e
- Crestani, D., Prunet, F., Chapurlat, V., Larnac, M., Magnier, J., & Chalvet, D. (1997). A generic model oriented multi criterion added-value analysis for factory modeling. Dans *World Manufacturing Congress WMC'97*.
- Deslauriers, J.-P. (2019). *Recherche qualitative: guide pratique -PDF Free Download*.
- DFGA - Direction de la formation générale des adultes. (2000). Guide méthodologique de recherche pour le milieu de l'alphabétisation. *Bibliothèque nationale du Québec, Direction de la formation générale des adultes (DFG)*. Repéré à file:///C:/Users/stdm2/Downloads/guideifpca2000.pdf
- Dickinson, J., Woodard, P., Building, S. C., & Institut pour la, B. I. M. a. C. (2016). *Manuel de pratique canadien pour la MDB : volumes 1, 2 et 3*. Ottawa: Institut pour la BIM au Canada.
- Dimyadi, J., Solihin, W., & Hjelseth, E. (2016). Classification of BIM-based Model checking concepts. *Journal of Information Technology in Construction, 21*, 354-370. Repéré à <https://www.itcon.org/paper/2016/23>
- Donato, V., Lo Turco, M., & Bocconcino, M. M. (2018). BIM-QA/QC in the architectural design process. *Architectural Engineering and Design Management, 14*(3), 239-254. doi: 10.1080/17452007.2017.1370995. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029451486&doi=10.1080%2f17452007.2017.1370995&partnerID=40&md5=ada2982a4ac111922b1422d1844ede80>
- Dybkaer, R. (2011). 'Verification' versus 'validation': A terminological comparison. *Accreditation and Quality Assurance, 16*(2), 105-108. doi: 10.1007/s00769-010-0729-y. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79251634411&doi=10.1007%2fs00769-010-0729-y&partnerID=40&md5=68b3327ffe3557d5fe90de6c4b663a8b>

- EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia. (2021a). *Guide to the standard for documented checks of engineering and geoscience work*. Repéré à <https://www.egbc.ca/Practice-Resources/Individual-Practice/Quality-Management-Guides>
- EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia. (2021b). *Guide to the standard for documented independent review of high-risk professional activities or work*. Repéré à <https://www.egbc.ca/Practice-Resources/Individual-Practice/Quality-Management-Guides>
- EGBC - Engineers and Geoscientists British Columbia. (2022). *Guide to the standard for the authentication of documents*. Repéré à <https://www.egbc.ca/Practice-Resources/Individual-Practice/Quality-Management-Guides>
- Elich, E., Schreinemakers, P., & Vullings, M. (2012). validation & Verification; an inconvenient truth. Dans *22nd Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering, INCOSE 2012 and the 8th Biennial European Systems Engineering Conference 2012, EuSEC 2012* (Vol. 1, pp. 694-706). Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84883503095&partnerID=40&md5=f74434285f4558fcc09915aa14b150ce>
- Elsevier. (2022). Scopus: la plus grande base de données de citations et de résumés.
- ENS - Engineers Nova Scotia. (2019). *Guideline for Use of the Professional Stamp*.
- Esteban, P., Pascal, J.-C., & Esteve, D. (2009). Une méthodologie de Conception Produit basée sur la norme EIA-632.
- Falardeau, M. (2020). *Enjeux de responsabilité face à la donnée numérique dans le contexte du BIM et du PLM* (Mémoire de maîtrise électronique, École de technologie supérieure).
- Gomez, J. M. M., Bedolla, J. S., Ricci, F., & Chiabert, P. (2014). Validation process model for product lifecycle management. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 7(2-3), 230-246. doi: 10.1504/IJPLM.2014.065868. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84914668376&doi=10.1504%2fIJPLM.2014.065868&partnerID=40&md5=7875642a4d3be6ea176dbfa44df386af>

- Hartley, D., & Starr, S. (2010). Verification and validation. Dans *Estimating Impact: A Handbook of Computational Methods and Models for Anticipating Economic, Social, Political and Security Effects in International Interventions* (pp. 311-336). Springer US. doi: 10.1007/978-1-4419-6235-5_11. Repéré à https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84865509497&doi=10.1007%2f978-1-4419-6235-5_11&partnerID=40&md5=05305ffe72d69485527cbfa41a2de730
- Hjelseth, E. (2015). BIM-based Model Checking (BMC). Dans *Building Information Modeling* (pp. 33-61). doi: doi:10.1061/9780784413982.ch02. Repéré à <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784413982.ch02>
- IEC - International Electrotechnical Commission. (2005). *IEC 61160 Design review / Revue de conception*. Repéré à https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61160%7Bed2.0%7Db.pdf
- Ingénieur Canada. (2022). Organismes de réglementation du génie au Canada. Repéré à <https://engineerscanada.ca/fr/excellence-en-matiere-de-reglementation/organismes-de-reglementation-du-genie>
- ISO - Organisation internationale de normalisation. (2015a). ISO-9000 - Quality management systems — Fundamentals and vocabulary.
- ISO - Organisation internationale de normalisation. (2015b). ISO-9001 - Systèmes de management de la qualité — Exigences.
- ISO - Organisation internationale de normalisation. (2018). *Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) : gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction. partie 2, phase de réalisation des actifs*. Genève, Suisse: ISO.
- Jacobsson, M., & Merschbrock, C. (2018). BIM coordinators: a review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(8), 989-1008. doi: 10.1108/ECAM-03-2017-0050. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053477804&doi=10.1108%2fECAM-03-2017-0050&partnerID=40&md5=3201170b15fdb72265934fbd1f588bee>

- Jean-Claude Guédeu. (2015). Étude et interprétation de la norme ISO 9001 : 2015. *Support formation ISO 9001-2015 V2 10-15.docx - Jean-Claude Guédeu/ Consultant QSE.*
- Karkasinas, A., & Rentizelas, A. (2019). Verification and validation: A novel product lifecycle management-based approach. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 12(2), 149-183. doi: 10.1504/IJPLM.2019.107007. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084613956&doi=10.1504%2fIJPLM.2019.107007&partnerID=40&md5=c6a5db31c0dbcc1e45e270d10ff32df7>
- Kwasniewski, L., & Bojanowski, C. (2015). Principles of verification and validation. *Journal of Structural Fire Engineering*, 6(1), 29-40. doi: 10.1260/2040-2317.6.1.29. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84923092188&doi=10.1260%2f2040-2317.6.1.29&partnerID=40&md5=0a7344140741076759053606cce2a2a5>
- LégisQuébec. (2022). *Lois sur les ingénieurs*. Québec: Éditeur officiel du Québec. Repéré à <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/l-9/>
- Loucopoulos, P., & Kavakli, E. (1995). Enterprise Modelling and the Teleological Approach to Requirements Engineering. *Int. J. Cooperative Inf. Syst.*, 4, 45-79. doi: 10.1142/S0218843095000032
- MacLeod, I. A. (2007). Structural engineering competence in the computer era. *Structural Engineer*, 85(3), 35-39. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33847041479&partnerID=40&md5=05e061264217f33fff767119ee9ee863>
- Makisha, E. (2019). Classification of Types of Verification for Building Information Models. Dans *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1-4 Oct. 2019 (pp. 4 pp.). IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934092. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934092>
- Maropoulos, P. G., & Ceglarek, D. (2010a). Design verification and validation in product lifecycle. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 740-759. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.005

- Maropoulos, P. G., & Ceglarek, D. (2010b). *Design verification and validation in product lifecycle* Article présentée à CIRP Annals - Manufacturing Technology. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.005. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955559150&doi=10.1016%2fj.cirp.2010.05.005&partnerID=40&md5=48f1ed872ffc544921a5cd528a32dcfd>
- McGraw-Hill. (2012). The Business Value of BIM in North America | Multi-Year Trend Analysis and User Ratings (2007–2012). *McGraw-Hill Construction SmartMarket Reports*. Repéré à The Business Value of BIM in North Americasite Web |URL| doi:DOI
- Menzel, C., & Mayer, R. J. (1998). The IDEF family of languages. Dans P. Bernus, K. Mertins & G. J. Schmidt (Éds.), *Handbook on Architectures of Information Systems* (pp. 209-241). Springer-Verlag.
- Meyer, G. C. (2016). Investigating a design validation process: How jurors handle criteria in a design competition. *Journal of Design Research*, 14(3), 203-218. doi: 10.1504/JDR.2016.079736. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84991798413&doi=10.1504%2fJDR.2016.079736&partnerID=40&md5=f05aa6158cf2f6ec9ca96f96f1eadac4>
- Nawari, N. O. (2012). BIM-Model checking in building design. Dans *Structures Congress 2012 - Proceedings of the 2012 Structures Congress* (pp. 941-952). doi: 10.1061/9780784412367.084. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866710077&doi=10.1061%2f9780784412367.084&partnerID=40&md5=0ebd70c10a9ad28d5941c98c38a18eb8>
- Office québécois de la langue française. (2023, 01 18). Algorithme. Repéré sur Office québécois de la langue française à <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/500478/algorithme>
- OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec. (2021a). *Document d'étude Examen professionnel*. Montréal: Ordre des ingénieurs du Québec. Repéré à <http://www.oiq.qc.ca/fr/jeSuis/membre/juniorat/examenProfessionnel/Pages/preparati on.aspx>

- OIQ - Ordre des ingénieurs du Québec. (2021b). *Guide de pratique professionnelle*. Repéré à http://gpp.oiq.qc.ca/Start.htm?#t=Profil_-_Structure_du_batiment.htm
- Revelle, J. B. (2002). *Manufacturing Handbook of Best Practices: An Innovation, Productivity, and Quality Focus*. St. Lucie Press. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=fysX3S1GdM0C>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. doi: 10.1002/9781119287568
- SAE - Society of Automotive Engineers. (2021). *Processes for Engineering a System*. SAE International.
- Scheer, A.-W. (1998). *ARIS, business process frameworks (2nd ed.)*. Springer-Verlag.
- Seiß, S. (2019). Development of model checking rules for validation and content checking. Dans P. De Wilde, L. Mahdjoubi & A. Garrigos Garrigos (Éds.), (Vol. 192, pp. 245-253). WITPress. doi: 10.2495/BIM190211. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102001003&doi=10.2495%2fBIM190211&partnerID=40&md5=d303558307909c0a154043cf104545a5>
- Solihin, W., & Eastman, C. (2015). Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*, 53, 69-82. doi: 10.1016/j.autcon.2015.03.003. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84925368852&doi=10.1016%2fj.autcon.2015.03.003&partnerID=40&md5=3f2d8ef3ad3039f801c69fee3813ce1e>
- Stark, R., Kind, S., & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 169-172. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.045. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018625620&doi=10.1016%2fj.cirp.2017.04.045&partnerID=40&md5=6e794121ed295bb11c912143067f17b9>
- Tissot, F., & Gruninger, M. (1999). *Process specification language psl*

informal documentation (Draft Report Contract 50-DKNB-8-90142, version 0.1).

Trudel, L., & Vonarx, N. (2007). La recherche qualitative est-elle nécessairement exploratoire?

Usabilis (Producteur). (2022, 11 24). Qu'est-ce que l'Utilisabilité? *usabilis.com*. Repéré à <https://www.usabilis.com/definition-utilisabilite-usabilite/>

Vernadat, F. (1997). Enterprise modeling languages, enterprise engineering and integration: Building international consensus. In K. Kosanke & J.

G. Nell (Eds.), Proceedings of ICEIMT'97, . Dans *International conference on Enterprise integration and Modeling Technology (Vol. 1, pp. 212–224)* (Springer. éd.). Springer.

Vernadat, F. (1999). *Techniques de Modélisation en Entreprise : Applications aux Processus Opérationnels*. Paris, Economica, Collection Gestion (in French).