



ANALYSE DU PROCESSUS BIM POUR DES DEMONSTRATIONS DE SECURITE FERROVIAIRE

A BIM PROCESS ANALYSIS FOR RAILWAY SAFETY DEMONSTRATION

BABAS Fahima
Vulcain Ingénierie, Paris
Université de Technologie de Troyes
Troyes
fahima.babas@vulcain-eng.com
GRALL Antoine
Université de Technologie de Troyes, LIST3N
Troyes
antoine.grall@utt.fr

DELOUX Estelle
Université de Technologie de Troyes, LIST3N
Troyes
estelle.deloux@utt.fr
ETHORE Emmanuel
Vulcain Ingénierie
Rouen
emmanuel.ethore@ccamy.com

Résumé — La progression du numérique dans le domaine des infrastructures ferroviaires conduit à l'adoption du BIM (Building Information Modeling soit la Modélisation des Informations du Bâtiment). Initialement porté par le secteur du bâtiment, qui est de plus en plus intégré par les experts métiers dans toutes les étapes du cycle de vie d'un bâtiment. Il est de nos jours en démocratisation dans d'autres domaines, notamment dans les projets d'infrastructure critique, dont les activités sont hautement encadrées.

Par notre expertise métier, notre recherche se focalise sur les projets d'infrastructures ferroviaires, étant donné qu'ils exigent de fournir des démonstrations de sécurité ferroviaire. Nos travaux visent à proposer une méthodologie structurée de modélisation en BIM 3D pour répondre à cette exigence, notamment pour la validation des tests sur site (c'est-à-dire effectués sur le terrain réel). Cet article présente une revue de littérature des avancées récentes en termes d'intégration du BIM dans ce secteur, accompagnée d'une veille technologique des solutions et des processus existants pour la démonstration de sécurité / sûreté de fonctionnement (SdF). Dans cette étude, nous suivons un processus défini nous permettant d'examiner la méthodologie « classique » du BIM, que nous complétons alors par notre analyse des retours d'expérience des enquêtes que nous avons menées auprès des experts métiers de ce secteur afin d'adapter cette méthodologie à leurs problématiques réelles de SdF sur site.

Cette méthodologie BIM vise à faciliter un usage du BIM dans la gestion de démonstration de sécurité / sûreté de fonctionnement d'une infrastructure ferroviaire.

Mots clefs — *Infrastructure ferroviaire, BIM, démonstration de sécurité, sûreté de fonctionnement.*

Abstract — The progression of digital technology in the field of railway infrastructure is leading to the adoption of BIM (Building Information Modeling). Initially supported by the construction sector, which has proven itself throughout the life cycle of a building, it is subsequently integrated in different areas, particularly in infrastructure projects.

In this context, our research focuses specifically on railway infrastructure projects and aims to propose a methodology for structuring 3D BIM for railway safety demonstrations. This article presents a literature review of recent advances in terms of BIM integration in the infrastructure sector and a technological watch of existing solutions and processes for safety demonstrations particularly for validating on-site tests. Then, a qualitative analysis will approach the classic BIM methodology and analyze the feedback to support the whole.

This BIM methodology should facilitate the management of the railway infrastructure safety.

Keywords — *digital, railway, infrastructure, BIM, methodology, safety demonstration.*

I. INTRODUCTION

L'évolution rapide des technologies dans le secteur ferroviaire a généré une demande croissante des approches novatrices visant à améliorer la gestion de plusieurs aspects liés aux infrastructures ferroviaires. Dans ce contexte, le Building Information Modeling (BIM) émerge comme une technologie disruptive de transformation digitale des pratiques métiers et offrant un cadre

29 méthodologique holistique pour la conception, la gestion et la prévention des risques liés aux infrastructures ferroviaires. Cette
30 communication se penche sur le potentiel du processus BIM dans le contexte spécifique des démonstrations de sécurité
31 ferroviaire, notamment pour gérer des problématiques liées à la réalisation des tests sur site ferroviaire. Ceci en explorant les
32 opportunités qu'offre le BIM pour optimiser la planification et l'efficacité opérationnelle dans la gestion des risques.

33 La sécurité des systèmes ferroviaires demeure une priorité majeure, et les démonstrations jouent un rôle crucial dans
34 l'identification, l'évaluation et la réduction des risques. Pour tout système ferroviaire, la réglementation française et européenne
35 exigent une étude de sécurité assurant une bonne maîtrise des risques associés au système. La norme NF EN 50 126-1, qui définit
36 la sécurité comme étant « *l'absence de risque inacceptable pour la santé des personnes ou l'environnement* », Cette norme
37 européenne fournit aux sociétés d'exploitation ferroviaire et aux industries ferroviaires de l'ensemble de l'Union européenne un
38 processus permettant de mettre en œuvre une démarche cohérente de management de la fiabilité, de la disponibilité, de la
39 maintenabilité et de la sécurité désignée par l'acronyme FDMS. En effet, notre recherche s'intéresse à la dernière composante
40 qui est la « Sécurité ». Cette norme stipule que « *l'acceptation du système en cours d'examen en tant que système présentant la*
41 *sûreté de fonctionnement nécessaire pour son usage prévu doit être basée sur les conditions suivantes : - le système a été*
42 *développé, vérifié et validé conformément à la série NF EN 50 126 ; - les exigences de sécurité spécifiées ont été satisfaites*
43 *conformément à la série NF EN 50 126* ».

44 Tout système ferroviaire doit suivre un processus de sécurité spécifique, ces processus se composant de plusieurs étapes : de
45 la définition du concept lié au système à étudier jusqu'à sa fabrication. Cette méthode traditionnelle est obligatoirement applicable
46 à toute démonstration de sécurité d'un système ferroviaire. Ce processus est lié à des réglementations qui rendent difficile
47 l'adoption de nouveaux outils numériques. Les outils de transformation digitale apparaissent alors comme une opportunité
48 stratégique pour améliorer la gestion des projets ferroviaires.

49 Le BIM fait partie des outils qui jouent un rôle fondamental dans la conception de systèmes complexes modernes (Barbieri
50 & Fantuzzi, 2016). Conçu à l'origine pour la modélisation et la gestion de l'information dans le domaine de la construction (C.P
51 Cheng et al. 2016), le BIM offre tout son potentiel pour le secteur ferroviaire. Il est de plus en plus considéré comme la meilleure
52 technique pour les projets de construction et d'infrastructures, puisque représentant à la fois différentes interfaces (graphiques,
53 etc.) permettant la manipulation de la base de données du projet que tous les acteurs ont besoin d'accéder, tracer les modifications
54 et les partager. A titre d'exemple, les directives européennes 2014/24/UE et 2014/25/UE ont accordé aux États membres la
55 possibilité d'imposer l'utilisation de l'outil BIM (Grodo Gregorio, 2023). En outre, le Parlement européen encourage aussi
56 l'adoption du BIM, il a créé un groupe de travail EUBIM Task Group qui rassemble 21 pays européens, dans le but de soutenir
57 l'introduction des technologies liées au BIM dans le domaine de la construction, pour faciliter les communications entre les pays
58 sur la méthodologie. En France la SNCF a lancé un vaste programme d'acquisition de BIM 3D pour ses infrastructures (Biancardo
59 et al., 2021) (Bensalah, 2018). Néanmoins, l'intégration efficace de la méthodologie BIM dans les évaluations de sécurité
60 ferroviaire reste un défi majeur (Eydieux et al, 2018) : plus son application est élargie à tous les acteurs collaborant sur un projet,
61 plus il est difficile d'y intégrer chaque spécificité de chaque expertise métier. Dans la sécurité ferroviaire, il est reproché aux
62 modèles (maquette 3D) un manque suffisant et récurrent de qualité qui entrave leur exploitation. De nombreux modèles 3D et
63 jumeaux numériques sont de nos jours déployés, mais leurs exploitations pour des problématiques liées à la sécurité sont très
64 limitées. Même si la cybersécurité du BIM est la même problématique de sécurité comme dans tout outil exploitant une base de
65 données, ici notre problématique est l'exploitation pour démontrer la sécurité du projet ferroviaire correspondant aux exigences
66 de certifications / réglementations.

67 En exploitant le potentiel qu'offre le BIM, notre étude analyse la possibilité de l'usage du BIM pour des démonstrations de
68 sécurité ferroviaire, notamment pour la réalisation des tests sur site. Pour ce faire, nous abordons quelques différentes applications
69 du BIM dans le domaine de la construction, puis dans le ferroviaire pour gérer des problématiques de sécurité. Nous examinons
70 ainsi les défis potentiels et les considérations éthiques liées à l'adoption généralisée du BIM dans le contexte de la sécurité
71 ferroviaire. Nous avons alors établi deux enquêtes, la première avec des professionnels du BIM pour comprendre ce qu'est la
72 méthodologie BIM, et la seconde avec des professionnels de la Sûreté de Fonctionnement pour comprendre comment l'outil
73 BIM pourra être utilisé pour remplacer des études de sécurité sur site ferroviaire. A partir de notre analyse qualitative des résultats
74 d'enquêtes, nous décrivons :

- 75 • Via l'enquête 1 : la méthodologie BIM auprès des professionnels du BIM, avec une description de comment chaque
76 étape est réalisée.
- 77 • Via l'enquête 2 : un processus de sécurité à suivre pour accepter l'utilisation de l'outil BIM pour la sécurité
78 ferroviaire,

79 Nous visons la mise en place d'une méthodologie commune et crédible de travail en BIM (MT-BIM) pour produire des études
80 de sécurité liées aux vérifications des tests sur site ferroviaire.

81 Finalement, nous effectuons un croisement entre la méthodologie BIM identifiée et le processus de sécurité est effectué. Ceci
82 va permettre d'appliquer le processus de sécurité sur la méthodologie BIM, ce processus va nous permettre d'effectuer une
83 première analyse de la méthodologie BIM identifiée, via des outils d'analyse de risques de Sûreté de Fonctionnement, dans le
84 but d'identifier l'ensemble des risques, causes et conséquences liés à celle-ci. Elle permettra par la suite, dans de futures études,
85 de déterminer des exigences de sécurité (contraintes de conception) et des mesures de couverture des risques.

86 Par cette étude, nous visons à démontrer comment un usage méthodologique du BIM peut améliorer la précision des
87 démonstrations liées à la sécurité des systèmes ferroviaire, et remplacer certaines étapes du processus de démonstration de
88 sécurité. Ce sont des étapes complexes à mettre en œuvre en temps et en compétence, qui ralentissent la mise en œuvre de ce

89 type de projet et en augmentent les coûts totaux. Ainsi le BIM représente une transformation digitale avec de nombreux avantages
90 pour le secteur et sa compétitivité.

91 II. REVUE DE LA LITTÉRATURE ET OBJECTIF

92 Le terme BIM a été lancé pour la première fois par Charles M. Eastman (Sacks, 2013), il désigne littéralement la modélisation
93 d'une construction de bâtiment générique (Vignali et al, 2021). L'association Mediaconstruct (<http://www.mediaconstruct.fr>) le
94 définit comme un « processus métier permettant de générer et d'utiliser les données du bâtiment pour le concevoir, le construire
95 et l'exploiter tout au long de son cycle de vie. Dans ce contexte, le BIM est un processus d'échange autour de maquettes
96 numériques dans un esprit de travail collaboratif interne à une entreprise ou interprofessionnel ». Il a été introduit dans le
97 domaine de la construction début des années 2000 (Sacks, R, 2013), depuis, plusieurs études ont montré un grand intérêt pour
98 l'efficacité du BIM, et de nombreux efforts ont été déployés pour identifier les avantages et les obstacles liés à l'utilisation du
99 BIM (Yalcinkaya, M & Singh, V.2015), (Volk, R. et al 2014). De plus, il y a eu un progrès significatif grâce aux écrits
100 académiques traitant ce sujet (Matejov, 2021), Selon une étude réalisée par l'Université de Cardiff en 2016, le nombre d'écrits
101 académiques a augmenté dans le monde depuis 2008 (Bradley et al., 2016).

102 De nombreux Etats dans le monde imposent des règles aux entreprises de construction, notamment dans le secteur du
103 bâtiment, en mettant en place des actions spécifiques pour rendre obligatoire l'utilisation du BIM. Le magazine BIM-manager
104 (<https://bim-manager.fr/le-bim-et-son-developpement-international/>) publie un rapport sur l'état d'adoption du BIM dans le
105 monde, en Europe par exemple, plusieurs actions sont menées depuis 2010, au Royaume-Uni 73% d'acteurs en 2020 contre 43%
106 en 2011 ont déclaré l'utilisation du BIM, en Espagne, en juillet 2015 le ministère espagnol de l'Infrastructure a lancé une stratégie
107 BIM nationale du pays rendant le celui-ci obligatoire pour les projets de secteur publique, en Finlande, les agences
108 gouvernementales exigence de déploiement de méthode BIM. En Asie, la Corée du Sud oblige l'emploi du BIM à des projets
109 dans le budget est supérieur à 50 millions dollars. La Chine, le Malaisie, Singapour, Japon Corée du Sud ainsi d'autres Etats ont
110 mis en place des directives BIM pour promouvoir l'adoption du BIM. Selon une publication sur le site timetobeem
111 (<https://timetobeem.com/adoption-bim/>), « aux Etats-Unis un rapport de 2020 de l'American Institute of Architects indique que
112 51 % des cabinets d'architectes américains utilisent le BIM pour des travaux facturables, avec une adoption de 100 % dans les
113 grandes entreprises et de 37 % dans les petites entreprises ».

114 En Europe, les directives européennes 2014/24/UE et 2014/25/UE ont accordé aux États membres la possibilité d'imposer
115 l'utilisation du BIM (Vignali et al, 2021). Aussi, le Parlement européen a créé un groupe de travail appelé EUBIM Task Group
116 qui rassemble 21 pays européens, pour soutenir l'introduction des technologies BIM dans le domaine de la construction et pour
117 faciliter le dialogue entre les pays sur la méthodologie. En France, aucune loi n'impose l'utilisation du BIM mais plusieurs
118 décisions ont été prises témoignant ainsi de la sensibilité du gouvernement aux avantages que procure le BIM. En effet, dès 2014,
119 il lance un Plan de Transition vers le bâtiment numérique. La fédération française du bâtiment affirme que le marché imposera
120 l'utilisation du BIM, selon leur publication sur le site <https://www.ffbatiment.fr/>, les appels d'offres qui demandent du « BIM »
121 se multiplient. Dans ce sens, le gouvernement a mis en place, la charte BIM 2022, lancée en novembre 2017 par ministère de
122 la Cohésion des Territoires à l'occasion du salon Bâtiment, cette charte est signée par 76 représentants de l'acte de construire.
123 Aussi, le Plan BIM, créé début 2022, qui s'inscrit dans la continuité du plan Transition Numérique dans le bâtiment, il vise à
124 généraliser l'utilisation du numérique dans le bâtiment et favoriser la montée en compétences des professionnels.

125 Dans le secteur du ferroviaire, le BIM a commencé à être mis en œuvre principalement dans des pays développés tels que la
126 Grande-Bretagne, la Suède et la France depuis 2013 (Endrej, M & Janka, A. 2021). Quelques articles en témoignent aussi de
127 cette volonté d'intégration du BIM dans ce secteur comme celui publié par l'École de gestion à l'Université des sciences et de la
128 technologie de Wuhan, cet article représente une méthodologie de contrôle des risques de sécurité pour la construction du métro
129 chinois basées sur le BIM (Meng, L, Hongliang & Y, Ping, L, 2018). La Chine est un des pays avec les niveaux d'adoption les
130 plus répandus du BIM. Selon une recherche de brevets et de publications scientifiques que nous avons effectuée, dix parmi quinze
131 des brevets sont localisés en Chine, Ils visent principalement à proposer des solutions en exploitant les données BIM afin de
132 prédire des défauts liés aux ponts ferroviaires, à des structures du tunnels, des véhicules ferroviaires passants etc.

133 Le BIM est de plus en plus adopté dans le ferroviaire, plusieurs organisations ferroviaires à travers le monde définissent le
134 BIM comme étant une solution inévitable à adopter, en Allemagne, Chine, Italie et en France. (Haubler et al, 2021). (Bensalah,
135 2018), dans son étude, présente différents projets d'adoption du BIM dans le ferroviaire ainsi que les différents avantages que
136 procure cette technologie tels que l'optimisation des coûts, une meilleure planification des besoins et assurer une bonne gestion
137 et exploitations des projets.

138 En France, la SNCF commence à son tour à utiliser le BIM, elle a notamment lancé en janvier 2019 un vaste programme
139 d'acquisition de BIM 3D pour ses infrastructures (Bensalah, et al., 2018). En 2022, selon une publication sur leur site
140 numerique.sncf.com. Bruno LANDES, chef de division à la Direction Générale Industrielle et Ingénierie chez SNCF Réseau
141 annonce :« Nous nous sommes rendu compte que nous étions leader en matière de jumeau numérique et de BIM en
142 environnement ferroviaire ». Depuis 2017, plus de 1200 personnes formées au BIM. Aussi, selon le site dalkia.fr
143 (<https://www.dalkia.fr/references/preparer-demain/bim-gem/>), la SNCF Gare & Connexion avec Dalkia filiale du groupe EDF
144 et stereoGraph spécialisé en visualisation 3D, s'associent pour créer un nouvel outil BIM pour 2024, qui constitue une plateforme
145 qui rassemblera un grand ensemble de données relatives à l'état et aux évolutions de plus d'une centaine de gare française. Cet
146 outil disruptif permettra d'avoir des données à temps réel des gares et du patrimoine associés ainsi permettre une meilleure
147 maintenance et exploitation des gares.

148 Les processus de démonstration et d'acceptation de la sécurité des systèmes ferroviaires sont complexes, ce qui rend difficile
149 l'intégration de nouveaux outils numériques de plus en plus répandus dans le domaine de la construction et des infrastructures.

150 Leur modélisation est complexe (Camarazo et al, 2023), dont cette complexité des projets ferroviaires est en partie justifiée par
151 des exigences réglementaires et normatives (Helfrich, V. & Romestant, F. 2015) visant à démontrer un niveau de sécurité
152 suffisant (pour ne pas exposer les utilisateurs à des risques non contrôlés). Cependant, ces exigences constituent un frein majeur
153 au déploiement de nouveaux outils numériques comme le BIM.

154 Très peu de solutions sont aujourd’hui élaborées pour soutenir les activités liées à la sécurité ferroviaire. Les équipes utilisent
155 principalement les logiciels de bureautique (traitement de texte, tableur, présentation, etc.) accessible sur tout ordinateur en
156 respectant des processus internes à chaque entreprise en ciblant une conformité avec les réglementations. Quelques solutions
157 publiées récemment vise à aider la validation des tests sur site ferroviaire telles que la signalisation, les ballasts, les gabarits des
158 obstacles, etc. En prenant l’exemple de vérification d’un gabarit des obstacles, celui-ci est défini par la norme EN 15273-3+A1
159 comme étant un « *espace, par rapport à la voie retenue, dite de référence, qui est à dégager de tout objet ou obstacle ainsi que*
160 *vis-à-vis du trafic sur les voies adjacentes, afin de permettre une exploitation sûre sur cette voie de référence* ». La vérification
161 d’un gabarit ferroviaire permet d’éviter les risques de heurts, elle suit des instructions spécifiques régit par la norme citée
162 précédemment pour le cas de la France. Traditionnellement, cette vérification se fait par un ensemble d’essais sur site à travers
163 un passage d’un volume de rame correspondant aux dimensions du gabarit souhaité à vérifier. Aujourd’hui, ces validations sont
164 assistées par des technologies liées aux scans 3D (par laser pour un nuage de points, par photographie, etc.) qui réalisent des
165 mesures automatiques et des évaluations des distances de sécurité.

166 Depuis 2015, certaines entreprises explorent des solutions d’aide aux études de gabarit ferroviaire. En 2018, le groupement
167 d’intérêt économique Eurailtest, fondé par la SNCF et la RATP, publie un article sur eurailtest.com
168 (<https://www.eurailtest.com/focus-technique-simgab/>) décrivant le logiciel appelé SIMGB (Simulation Gabarit), développé par
169 DGII VA (SNCF Réseau) et le CIM (Centre d’Ingénierie du Matériel-SNCF Mobilités), qui permet de récupérer des résultats de
170 simulation issus de circulation sur une voie et implémenter les gabarits de vérification à partir de contours de références tout en
171 prenant en compte les implantations des quais. L’entreprise MIRE (filiale du groupe français des travaux publics NGE, spécialisé
172 dans les travaux ferroviaires, bâtiment, etc.) utilise des solutions intégrant des scans 3D comme données entrantes pour la
173 réalisation des études de gabarit. Plus récemment en 2023, l’entreprise The Cross Product, publie sur son site internet
174 thecrossproduct.com (<https://www.thecrossproduct.com/fr/en/etude-gabarit>) un cas d’usage d’étude de gabarit ferroviaire grâce
175 à une technologie LIDAR 3D1. Cette technologie combinée avec des fonctionnalités basé sur des modèles d’intelligence
176 artificielle permet d’anticiper et de prévenir les risques de collisions de train avec des volumes extérieurs, tout en vérifiant les
177 distances de sécurité (tel qu’évaluant la taille d’un gabarit sur une infrastructure ferroviaire). La plupart des technologies aident
178 à l’étude et ne remplace en aucun cas les méthodologies anciennes de passage de rame sur site afin de valider la sécurité liée au
179 gabarit. Dans la lignée de ces solutions, nous présentons une première proposition de méthodologie spécifique permettant de
180 remplacer certaines études liées à la validation de certains systèmes ferroviaires tel que le gabarit par la technologie BIM. Cette
181 étude nous permettra de diffuser notre méthodologie, afin de continuer à échanger avec les experts métiers pour que notre
182 communauté technique et scientifique finissent par établir une méthodologie commune à toutes les parties prenantes (sociétés
183 spécialistes, donneurs d’ordre et prestataires, équipes de chercheurs, organismes de certification, pouvoirs publics, etc.).

184 L’intégration efficace de la méthodologie BIM dans des évaluations de sécurité ferroviaire reste un défi majeur, notamment
185 pour digitaliser une partie des tests sur site. Dans le cadre de cette communication, une approche systématique a été adoptée,
186 visant ainsi à explorer les implications du Building Information Modeling (BIM) dans le contexte de la sécurité ferroviaire,
187 l’objectif est d’établir une nouvelle méthodologie de travail en BIM (MT-BIM) pour des démonstrations de sécurité ferroviaire
188 notamment pour la phase des tests sur site.

189 III. METHODOLOGIE

190 Nous avons identifié dans la section précédente les majeures avancées de la recherche liées à l’utilisation du BIM dans le
191 ferroviaire, la suite de cet article nous essayerons de répondre à ces questions :

- 192 • Pourquoi le BIM n’est pas utilisé pour remplacer des tests sur site ferroviaire ?
- 193 • Comment pouvons-nous élargir son utilisation dans ce contexte ?
- 194 • Quelles exigences de sécurité à appliquer à la méthodologie BIM pour faire de la sécurité ferroviaire ?

195 A. Une des utilisations du BIM :

196 Une revue des principaux usages du BIM notamment dans le secteur ferroviaire et son impact sur la sécurité a été entrevue.
197 Cette étape est décrite dans la section II. Elle nous a permis de repenser l’ensemble du travail existant, ainsi constater que très
198 peu de travaux dans le secteur ferroviaire ont été faits et la majorité identifiée traitent de la capacité du BIM à améliorer la
199 conception, la gestion et la maintenance des infrastructures ferroviaires, la simulation de scénarios d’urgence liés à la gestion des
200 accidents sur les chantiers, etc.

201 B. BIM et sécurité ferroviaire :

202 Après notre revue de la littérature et des solutions sur l’utilisation du BIM dans le ferroviaire, nous avons entamé une première
203 recherche auprès des professionnels de la Sûreté de Fonctionnement, amenant à 17 retours d’expérience dont 2 d’entre eux sont
204 experts dans ce domaine avec plus de 15 ans d’expériences. Le but est de comprendre les verrous actuels qui font que cet outil

205 n'est pas totalement exploité pour faire des démonstrations de sécurité, notamment pour ceux sur sites ferroviaires. La plupart
 206 des experts interviewés ont prononcé la problématique de manque de « confiance » dans le modèle : la qualité des modèles
 207 générés ne permet pas de réaliser ce type d'étude. Les autres répondant contestent la possibilité d'utilisation du BIM pour aider
 208 numériquement les tests sur site. Nous retrouvons ici les mêmes réponses d'experts que d'autres technologies disruptives ont
 209 vécus, tels que les modèles d'IA, les blockchains, les impressions 3D, les réalités virtuelles/augmentées, les jumeaux numériques,
 210 ... ceci par manque de vulgarisation, de formation, de retour sur investissement, de fonctionnalités adaptées au besoin métier et
 211 de démonstration de leur performance dans les cas pratiques réels des experts métiers. Pour traduire l'incertitude liée à la
 212 confiance des modèles générés, nous avons défini, en se basant sur les retours d'expériences, un processus permettant de répondre
 213 à la problématique de la confiance en le modèle 3D.

214 Pour la présente étude, partant du principe que les risques liés à la sécurité d'un système ferroviaire sont couverts par la bonne
 215 application des tâches et des procédures du processus de démonstration et d'acceptation de la sécurité selon la norme EN NF
 216 50 126-2.2017, nous suivons ces procédures pour le développement d'une MT-BIM d'un niveau de confiance élevé vis-à-vis
 217 du besoin en Sûreté de Fonctionnement. La figure 1 représente le processus à suivre que nous avons adapté à notre recherche.
 218 Dans ce papier, nous présentons notre méthodologie basée sur le BIM adapté aux étapes 1 à 3. Tout comme dans les cycles en V
 219 des processus industriels certifiés, nous délimitons la complexité de cette transformation digitale étape par étape afin d'en mesurer
 220 toutes les limites, les retours d'expériences pour des actions correctrices et finalement les avantages. L'intégralité du processus
 221 dont une partie de la phase 3 et les suivantes font l'objet de nos travaux de recherche complémentaire qui seront publiés
 222 ultérieurement.



223

224

Fig. 1. Processus d'acceptation de la sécurité adopté pour l'étude. Source : NF EN 50 126.1-2017

225

En application du processus de la fig. 1 :

226

1) Etape 1 : définition du concept :

227

Nous définissons la méthodologie BIM relative aux projets ferroviaire. Le but de cette phase 1 est de développer une
 228 compréhension globale de cette méthodologie en recueillant le maximum d'informations et de données sur ses différentes étapes
 229 menant à la modélisation finale (BIM d'une maquette 3D) d'un projet ferroviaire existant.

230

Comme indiqué, nous avons mené une première enquête : 26 entretiens en face à face ont été effectués dans le but de dresser
 231 une trame globale des différentes étapes liées à la MT-BIM pour la modélisation d'un projet ferroviaire. Le tableau 1 retrace les
 232 différentes étapes tirées des réponses des interviewés.

233

TABLE 1. PHASES DU PROCESSUS DE REALISATION DES MODELES 3D EN BIM DES PROJETS EXISTANTS.

Methodologie BIM pour les projets existants					
Phases 1 - 16					
1. Réalisation des données d'entrée					
Nuage de points	Plan de voie	Plan topographique	Plan Génie Civil	Photos de l'existant	Autres
Réalisation					
Assemblage					
Nettoyage					
Découpage					
Echantillonnage					
2. Partage des données d'entrée par le service					
3. Réception du cahier des charges client					
4. Analyses					
5. Réponse appelle d'offre					
6. Réception / Téléchargement / Sauvegarde des données d'entrée					
7. Analyse des données					
8. Echange avec le client (validation / ou non des données d'entrée)					
9. Réalisation d'un Planning (WBS Work Breakdown Structure)					
9.1 Organisation de l'équipe projet					
9.2 Liste des livrables					
9.3 Planning des tâches					
10. Réunion de lancement interne					

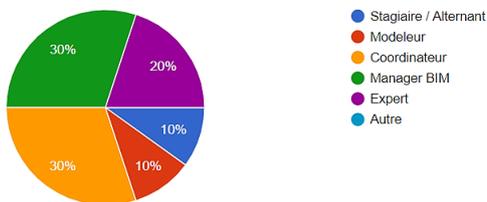
11. Préparation du fichier de travail	
Création d'un Fichier de Gabarit de travail	
Création d'un fichier géoréférencement	
12. Début de modélisation	
Découpage en zone du Nuage de points	
Nettoyage des zones	
13. Modélisation par lot des objets et renseignements des paramètres (DATA)	
14. Assemblage / insertion des modèles 3D dans le fichier de travail des différents lots	
15. Coordination des différents modèles 3D et contrôle qualité de la maquette	
16. Livraison	

234

235 2) Etape 2 : définition du système et du contexte opérationnel :

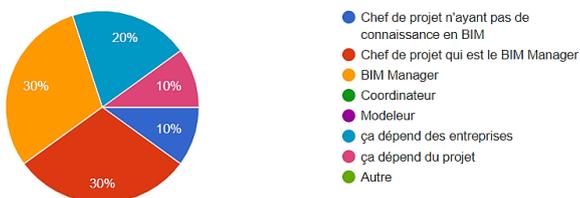
236 L'objectif de cette phase 2 est de décrire en détail les étapes de la méthodologie et de comprendre comment celles-ci sont
 237 développées et menées. Pour ce faire, une deuxième enquête a été réalisée : les 26 interviewés ont été aussi sollicités pour
 238 répondre à un questionnaire diffusé en ligne. 30 autres nouveaux répondants ont aussi été recueillis (après filtre des réponses
 239 non tangibles / hors sujet). Le questionnaire est divisé en trois parties : (Partie 1) Informations sur le répondant, (Partie 2)
 240 Connaissance approfondie du répondant pour la phase appel d'offre d'un projet ferroviaire en BIM. (Partie 3) Connaissance
 241 approfondie du répondant tout au long de la phase exécution d'un projet ferroviaire en BIM jusqu'à sa livraison. Les questions
 242 ont été conçues selon le schéma d'un seul choix de réponse ou en remplissant sa propre réponse. Le but de ce questionnaire est
 243 de réemployer notre méthodologie mises en place lors des entretiens de la première enquête pour pouvoir à la fois faire confirmer
 244 aux répondants les étapes du tableau 1, de comprendre comment elles sont opérées dans chacune de leurs entreprises, mais aussi
 245 et surtout de récolter un maximum d'informations et de données sur les défaillances ou les problématiques que chaque Ingénieur
 246 / Manager / Coordinateur BIM a déjà rencontrées durant sa carrière : tout ce qui ont généré des ralentissements dans leurs projets,
 247 du non-respect des temps (deadlines) du cahier des charges, et tout ce qui engendre un modèle 3D d'un détail de conception trop
 248 médiocre pour un usage aux normes professionnels.

249 A titre d'illustration, voici un exemple de réponse à une question liée à la phase exécution qui est une phase très importante
 250 pour la définition du déroulé global du projet et qui pourra affecter la qualité des modèles produits, « L'organisation de l'équipe
 251 de projet doit être définie par qui ? », plusieurs choix de réponses ont été proposés. La figure 2, représente le profil des répondants
 252 et la figure 3 représente les réponses obtenues à la question. Nous constatons immédiatement que les réponses sont très disparates.



253

254 Fig. 2. Profils des répondants au questionnaire



255

256 Fig. 3. Exemple de réponses sur l'organisation de l'équipe de projet

257 L'organisation de l'équipe de travail peut être défini par des personnes différentes d'une entreprise à l'autre et selon les
 258 interviewés chaque entreprise s'organise selon ses ressources et aucune loi n'est présente pour autoriser ou non une personne à
 259 valider des données d'entrée d'un projet de gare ferroviaire par exemple. Également, la figure 4 montre les réponses liées à la
 260 question suivante : « pensez-vous qu'il y a des erreurs qui peuvent être commises durant cette phase de réception et validation de
 261 données d'entrée ? ». 80% des répondants ont dit « oui » et le reste ont répondu « je ne sais pas ». Les réponses reçues sur la
 262 majorité des questions posées sont très différentes d'un acteur à un autre, ce qui montre que la méthodologie de travail en BIM
 263 est très variée d'une entreprise à une autre. Le processus suivi est dans sa globalité le même, mais le détail concernant la
 264 méthodologie de travail varie d'une entreprise à une autre. Ce qui justifie le manque de confiance en les modèles 3D produits.

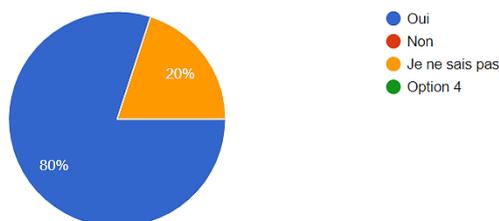


fig. 4. Réponses à la question : pensez-vous qu'il y a des erreurs qui peuvent être commises durant cette phase de réception et validation de données d'entrée ?

3) Etape 3 : analyse et évaluation du risque :

Cette phase 3 vise à identifier les différents risques associés aux étapes de la méthodologie, définir le principe d'acceptation de la sécurité retenu, définir les critères d'acceptation du risque et évaluer le risque. L'évaluation du risque sera présentée dans les prochains travaux. Nous exploitons les résultats de l'enquête avec les professionnels du BIM : toutes les données sont récoltées sous format tableur, concernant les défaillances et les verrous / problématiques que chaque professionnel BIM a déjà rencontrées et qui engendrent un modèle 3D d'un détail de conception trop médiocre pour être exploité dans les normes, alors qu'ils sont nécessaires à leurs études de sécurité (Sûreté de Fonctionnement ferroviaire).

Pour la définition du principe d'acceptation de la sécurité adopté : trois principes d'acceptation du risque sont décrits dans la norme EN NF 50 126-2. 1) utilisation de code de bonne pratique et évaluation du risque : en ce qui concerne la méthodologie de travail en BIM, aucun code de bonne pratique lié à la sécurité ferroviaire n'existe. 2) utilisation d'un système de référence : il n'existe pas d'études similaires pour comparer. 3) Utilisation de l'estimation du risque explicite. Avec les données récoltées de l'enquête, il nous est impossible, dans le cadre de cette recherche, d'appliquer les deux premiers principes, nous suivons le troisième cas pour le développement d'une méthodologie d'utilisation du BIM en faveur des tests de sécurité ferroviaire.

Pour la définition des critères d'acceptation et d'évaluation des risques, des échanges avec des professionnels du BIM et de la Sûreté de Fonctionnement au sein de Vulcain ont été effectués. Le tableau 2 représente la matrice de risque adoptée pour le projet.

TABLE 2. MATRICE D'ACCEPTATION DU RISQUE

Niveau	Niveau de gravité	Conséquences sur la maquette	Conséquences pour les personnes ou l'environnement
4	Catastrophique	Maquette non conforme à la réalité (tel que construit) : vérification de sécurité impossible	Très nombreuses équivalences en décès (probablement plus de 10) ou dommages extrêmes pour l'environnement.
3	Critique	De multiples erreurs ayant un impact sur la sécurité. Maquette partiellement conforme	Un mort ou une personne grièvement blessée, ou des dommages significatifs pour l'environnement.
2	Marginale	Une erreur ayant un impact sur la sécurité	Blessures légères ou dommages mineurs pour l'environnement.
1	Insignifiant	Erreur n'ayant pas d'impact sur la sécurité	Blessures légères éventuelles.

Pour analyser les risques liés à la méthodologie de travail en BIM, et dans le but de suivre le principe d'acceptation de sécurité adopté, trois outils communément utilisés ont été choisis, à savoir l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des modes de défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC) et l'Arbre de Défaillance (AdD). Ces analyses peuvent évoluer par de futurs retours d'expérience sur les cas pratiques réels que nous étudions avec les experts métiers BIM, mais nous présentons dans cette section notre version 2023 de ses analyses reprenant l'ensemble des risques potentiels liés à la MT-BIM et ayant obtenu une majorité d'approbation lors de sa présentation pendant la seconde enquête. Les tableaux d'analyses du risque définis sont les suivants :

TABLE 3. NIVEAUX DE FREQUENCES (SOURCE : NF EN. 50 126.1-2017)

Classification	Niveau de fréquence	Description
6	Fréquent	Il est probable qu'il arrive fréquemment. Le danger est expérimenté de manière continue.
5	Probable	Il arrive plusieurs fois. Il est possible que le danger survienne fréquemment.
4	Occasionnel	Il est probable que l'événement se produise à plusieurs reprises.. Le danger peut survenir à plusieurs reprises.
3	Minime	Il pourrait arriver une fois dans le cycle de vie du système. Il est raisonnable de penser que le danger survienne.
2	Improbable	Il est improbable, mais possible d'arriver. Il est possible de supposer que le danger peut survenir exceptionnellement.
1	Négligeable	Il est extrêmement improbable qu'il arrive. Il est possible de supposer que le danger ne va pas survenir.

TABLE 4. NIVEAUX DE GRAVITE (SOURCE : NF EN 50 126.1- 2017)

		Niveaux de gravité			
		Catastrophique (4)	Critique (3)	Marginal (2)	Insignifiant (1)
Fréquence de survenue	Fréquent (6)	Intolérable	Intolérable	Intolérable	Indésirable
	Probable (5)	Intolérable	Intolérable	Indésirable	Tolérable
	Occasionnel (4)	Intolérable	Indésirable	Indésirable	Tolérable
	Minime (3)	Indésirable	Indésirable	Tolérable	Acceptable
	Improbable (2)	Indésirable	Tolérable	Acceptable	Acceptable
	Négligeable (1)	Tolérable	Acceptable	Acceptable	Acceptable

TABLE 5: CATEGORIES D'ACCEPTATION DU RISQUE (SOURCE : NF EN 50 126.1- 2017)

Intolérable	Il faut le supprimer.
Indésirable	Il ne peut être acceptable que quand la réduction du risque soit irréalisable. Pour ce cas, il faut faire recours aux autorités ferroviaire pour avoir un accord.
Tolérable	Acceptable avec un contrôle adéquat et avec l'accord de l'Autorité ferroviaire.
Acceptable	Acceptable sans aucun accord

Après la définition de la matrice de sécurité et l'adoption des tableaux liés à l'analyse de sécurité, les trois outils d'analyse, à savoir, l'APR, l'AMDEC et l'AdD ont été entamés :

Analyse Préliminaire des Risques (APR) : A partir de la méthodologie produite dans l'étape précédente « définition de la méthodologie BIM », nous créons un tableau d'APR pour une évaluation initiale des risques liés à la méthodologie de travail en BIM, identifiés lors de l'enquête avec les professionnels BIM. Les éléments présentant une criticité non acceptable sont ultérieurement soumis à une analyse approfondie avec les managers BIM Vulcain. Le travail avec les managers se déroule sous forme d'une série d'entretiens orientés par notre préanalyse afin de l'affiner au fur et à mesure. Le tableau 5 décrit un extrait d'APR, pour chaque risque lié à la méthodologie BIM, une cause a été identifiée ainsi un niveau de gravité est défini selon la matrice de sécurité définie en amont et un niveau de fréquence associé en suivant les retours d'expériences des professionnels du BIM.

TABLE 6. EXTRAIT D'APR

Ident.	Risques potentiels ROCESSUS	Applicable	Cause possible	Niveau de gravité	Fréquence	Niveau de criticité
A4	<i>Modélisation 3D de qualité insuffisante</i>					
A2_01	<i>Mauvaise / Absence d'analyse des données d'entrée</i>					
			Analyse effectuée par une personne sans les qualifications requises	3	3	
			Absence de vérification des données si les données seront validées par une personne sans les qualifications requises	3	3	
A2_02	<i>Données d'entrée employées de qualité insuffisante</i>					
		Oui	Nuage de points de qualité insuffisante	4	5	
		Oui	Plan GC utilisé de qualité insuffisante	4	3	
		Oui	Plan de voie de qualité insuffisante	4	3	
		Oui	Plan de structure de qualité insuffisante	4	3	
		Oui	Plan d'architecture de qualité insuffisante	4	3	
		Oui	Utilisation de photos pour compléter les maquettes 3D	4	5	
		Oui	Analyse et validation des données d'entrée par une personne ayant une maturité BIM non qualifiée	4	4	
		Oui	Mauvaise analyse des données d'entrée et validation de celles-ci alors qu'elles ne sont pas suffisantes	4	4	
A2_03	<i>Organisation d'équipe non conforme au besoin projet / Ou absence d'organisation</i>					
		Oui	Une organisation d'équipe effectuée par une personne sans les qualifications requises	2	3	
		Oui	Mauvaise compréhension du cahier des charges	2	3	

	Oui	Non-respect des missions par les personnes qui participent à la modélisation	2	3	
--	-----	--	---	---	--

311

312 **Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)** : pour détailler l'analyse, nous créons
 313 aussi un tableau AMDEC, le but est de renoncer les faiblesses / défaillances liées à chacune des étapes de la méthodologie de
 314 travail en BIM ainsi les hiérarchiser et proposer des prescriptions de sécurité selon leur niveau de criticité afin de les maîtriser.
 315 L'AMDEC est revue par un expert BIM Vulcain, cette revue s'est déroulée sous forme d'une série d'entretiens effectués tous les
 316 mois afin de la mettre à jour et de la compléter. L'AMDEC est validée par l'équipe Sûreté de Fonctionnement par une série
 317 d'entretiens autour de tables rondes. L'image ci-dessous représente un bout de cette analyse.

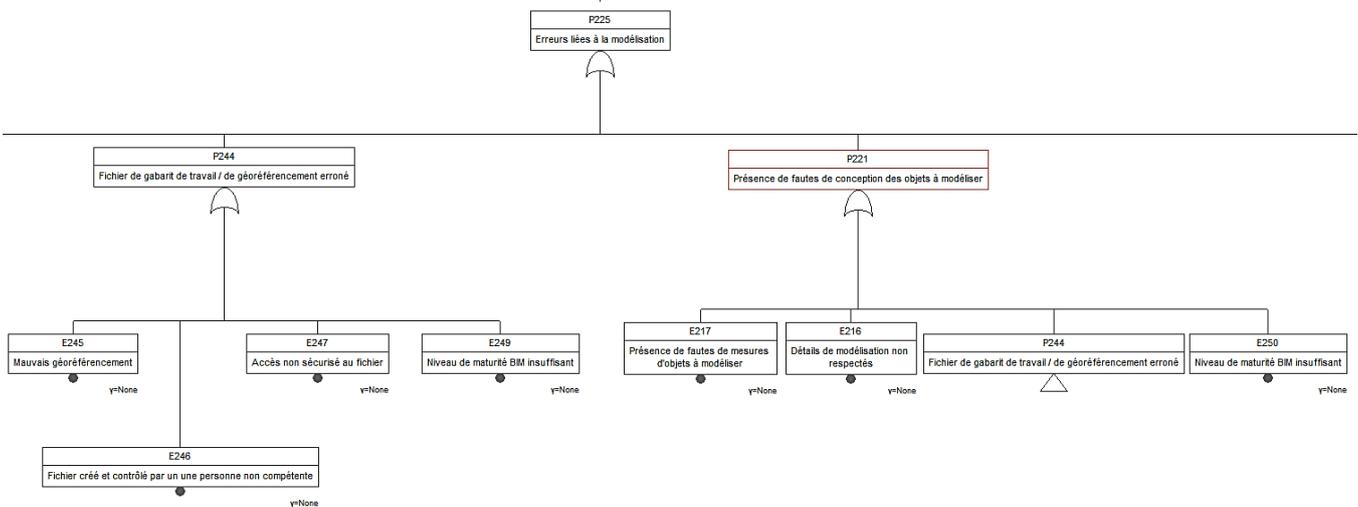
Description de la fonction	Fonction / sous fonctions	Rôle dans la démonstration de sécurité	Impact sur la sécurité	Impact sur l'accessibilité	Aspect ERP	Modes de défaillance	Probabilité	Effets immédiats		Dangers sur le système ferroviaire, si vérification de sécurité effectuée	Cause possible	Fréquence	Gravité	Criticité
Nettoyage du nuage de points	-	Détection précise des zones dangereuses Assurer une modélisation d'un niveau de sécurité suffisant pour l'aide aux démonstrations de sécurité Permettre la bonne superposition de toutes les maquettes BIM Assurer un bon géoréférencement des maquettes et donc des emplacements de la	OUI	NON	NON	Nettoyage agressif		Nuage de points non complet / points insuffisants et manque d'informations Modélisation non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche	* Nuage de points de qualité insuffisante * Manque de compétence de la personne qui effectue le nettoyage * Non respect des règles de nettoyage s'il y en a * Nombre de points déjà relevés insuffisant * Absence de vérification du nettoyage * Vérification du nettoyage du NP par une personne compétente	4	4	
						Nettoyage insuffisant		Nuage de points non complet / points insuffisants et manque d'informations Modélisation non conforme à la réalité		* Risque	4	2		
						Perte avec une dénivellée plus importante / fort pourcentage que l'existant		Niveau topographique non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche opposé * Risque de collision avec un obstacle	* Données d'entrée non conforme à la réalité ou de mauvaise qualité * Manque de compétences et de maturité BIM * Puissance limitée des machines et des logiciels * Absence de vérification périodique par une personne compétente	4	4	
							Emplacement des caténaires non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche opposé * Risque de collision avec un obstacle	5		4		
							Emplacement de végétation non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche opposé	5		4		
							Emplacement des quais non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision avec un obstacle fixe	5		4		
							Niveau de voie non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche opposé	5		4		
							Niveau des rails non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape * Risque de collision par sens de marche opposé	5		4		
							Niveau topographique non conforme à la réalité		* Risque de déraillement * Risque de collision par rattrapage * Risque de collision par prise en échape	5		4		

318

319 Fig. 5. Extrait d'AMDEC

320 **Arbre de Défaillance (AdD)** : En complément des deux premières analyses, nous procédons à produire un AdD ayant pour
 321 événement sommet « Vérification de sécurité basée sur un modèle numérique de qualité insuffisante ». La qualité insuffisante
 322 des modèles est définie par le fait que les données projets sont incomplètes et non satisfaisantes vis-à-vis des rendus souhaités.
 323 Afin d'évaluer la confiance placée dans la réalisation des exigences de sécurité et de s'assurer du développement d'une
 324 méthodologie sûre et efficace en faveur de la sécurité ferroviaire, la probabilité de survenue de l'événement redouté sera calculée
 325 et étudiée dans de prochaines études.

326 Pour la réalisation de l'AdD, nous avons exploité les deux analyses précédentes ainsi que les données récoltées sur les erreurs
 327 que les professionnels BIM rencontrent durant leur travail en BIM, et qui pourraient affecter la qualité du modèle 3D, nous
 328 procédons à la réalisation d'un arbre de défaillance en détaillant pour chaque niveau d'arbre les événements redoutés jusqu'au
 329 événements de base. L'événement sommet est, en se basant sur la première enquête effectuée avec les professionnels de la Sûreté
 330 de Fonctionnement, identifié comme l'une des principales causes freinant l'utilisation des modèles 3D BIM pour des
 331 démonstration de sécurité d'un projet ferroviaire, notamment des tests sur site, nous procédons donc à son analyse via l'AdD. La
 332 figure ci-dessous représente une branche de l'AdD réalisé.



333

334 Fig. 6. Extrait d'AdD

335 Cette étape présente une première partie de l'analyse de la méthodologie de travail en BIM, chacune de ces analyses a permis
 336 d'identifier un grand ensemble de risques, de causes et de conséquences pour pouvoir comprendre et limiter les erreurs commises
 337 lors d'une réalisation d'un projet ferroviaire en BIM. La suite de ses analyses sera présentée dans de prochaines études pour
 338 pouvoir évaluer le risque et identifier les exigences de sécurité associées aux différentes étapes de la méthodologie.

339

340

IV. EXIGENCES ET PRECONISATIONS

341

À la suite des différentes analyses de sécurité présentées dans la section précédente, et selon le niveau de criticité identifié,
 342 des exigences de sécurité ont été identifiées. Ceci donne un premier résultat permettant de structurer la méthodologie BIM afin
 343 d'assurer des modèles de qualité et d'un niveau de détail suffisant.

344

A. Exigences de sécurité tirées de l'APR :

345

L'APR nous a permis de mettre en place un ensemble d'exigences de sécurité liées aux différentes étapes de la méthodologie
 346 BIM. Selon le niveau de criticité lié au risque une exigences est mise en place afin de réduire ou d'éliminer son impact sur les
 347 modèles 3D produits. Le tableau 6 présente une version 2023 des exigences de sécurité à adopter.

348

TABLE 7. EXTRAIT D'EXIGENCES DE SECURITE.

Risques potentiels ROCESSUS	Phase du process	Niveau de criticité	Mesure de réduction du danger
Données d'une qualité insuffisante			
Nuage de points d'un niveau de qualité insuffisante			
Erreur de relevé sur site			
	Réalisation des données d'entrée		Assurer un réglage des appareils Etalonnage des appareils
			Assurer que la personne à effectuer le relevé ait une bonne maîtrise des équipements Assurer un accompagnement des débutant sur le terrain par une personne formée,
			Assurer que la personne à effectuer le relevé ait une bonne maîtrise des équipements
			Assurer une définition au préalable du parcours de Scan Assurer la présence d'un personnel formé
			Garantir une réalisation de relevé avec des conditions climatiques adéquates
			Interdiction formelle de réalisation de relevé laser en jour de pluie
			Interdiction formelle de réalisation de relevé laser e présence de fumées
			Assurer une présence de deux personnes pour visualiser et contrôler le relevé
			Assurer que la personne à effectuer le relevé ait une bonne maîtrise des équipements
			Assurer une vérification du site avant de commencer le relevé
			Assurer une analyse de sécurité du site à relever avant de faire le relevé pour identifier les modalités de réalisation, ainsi assurer une superposition avec l'analyse effectuée par le client
			Assurer une vérification globale du site à relever
			Garantir un matériel et logiciel adéquats, 2mm de précision du rendu
Erreur d'assemblage			
	Réalisation des données d'entrée		Assurer l'applicabilité des mesures de réduction de risque liées au A1_01_01
			Assurer que la personne à effectuer le relevé ait une bonne connaissance des règles d'exécution
			Assurer un recouvrement suffisant entre chaque Scan en ayant une personne soit expérimentée toute seule à faire le relevé ou pour accompagner une personne qui n'est pas expérimentée
			Assurer la bonne compréhension du besoin Assurer un contrôle du relevé par une personne compétente Accompagnement de personnes non compétente sur le terrain
			Assurer que la personne à effectuer le relevé ait une bonne connaissance des règles d'exécution
			Garantir du matériel et logiciels adéquat
Erreur de nettoyage	Réalisation des données d'entrée		
Nettoyage agressif du nuage de points	Réalisation des données d'entrée		
	Réalisation des données d'entrée		Assurer que la personne à effectuer le nettoyage ait une bonne connaissance des règles d'exécution
			Assurer la présence d'une personne compétente et formée pour vérification et validation du nettoyage
			Assurer la bonne lecture et l'analyse du cahier des charges

349

350 **B. Exigences de sécurité tirées de l'AMDEC :**

351 Le tableau 7 présente un extrait des mesures de sécurité réalisées avec l'AMDEC, elle regroupe une version 2023 des
 352 exigences de sécurité à suivre pour réduire le risque lié à la méthodologie BIM. Les exigences ont été développées en utilisant
 353 les différents échanges effectués avec les professionnels BIM et Sûreté de Fonctionnement. Ces échanges nous ont permis
 354 d'identifier l'ensemble des causes liées aux modes de défaillance qui ont été utilisés pour mettre en place un ensemble de mesure
 355 de sécurité. Ces mesures vont être clôturées une fois toutes les analyses seront terminées.

356 TABLE 8. EXTRAIT DES EXIGENCES DE SECURITE TIRES DE L'AMDEC

Modes de défaillance	Criticité	Prescription de sécurité
Relevé très encombré par de points inutiles		La personne en charge de réaliser le relevé sur site doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire, Mise en place d'un scan pouvant fournir un détail de relevé < 1 mm
Relevé de points insuffisants		La personne en charge de réaliser le relevé sur site doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire, Mise en place d'un scan pouvant fournir un détail de relevé < 1 mm
Relevé erroné		La personne en charge de réaliser le relevé sur site doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire _Mise en place d'un scan pouvant fournir un détail de relevé très élevé < 1 mm
Assemblage erroné		En cas d'assemblage, la personne en charge de réaliser l'assemblage doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
Assemblage avec décalage millimétrique et non visible à l'œil sur le logiciel		En cas d'assemblage, la personne en charge de réaliser l'assemblage doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
Nettoyage agressif		La personne en charge de réaliser le nettoyage doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
Nettoyage insuffisant		La personne en charge de réaliser le nettoyage doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
		La personne en charge de réaliser le découpage doit avoir 3 ans d'expérience minimum dans le domaine. Si moins, si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
Echantillonnage agressif		En cas d'échantillonnage effectué, la personne qui effectue l'échantillonnage doit avoir au minimum 3 ans d'expériences, si moins, une vérification par une personne ayant 3 ans d'expérience dans le domaine est obligatoire
Ancienne photo non conforme		Interdiction d'utiliser des photos anciennes pour modéliser des éléments liés à la sécurité sur le modèle 3D
Validation des données d'entrée (NP) d'un détail de scan non adéquat au besoin final		L'analyse des données d'entrée doit être effectuée par un Manager BIM Vérification obligatoire de la qualité des données d'entrée par un Manager BIM et un référent sécurité Exigence d'un document technique en référence au : NP détail : appareil utilisé et le détail qu'il fournit Spécification de tout documents contenant une zone déjà rénové sur le site en réalité
Livrable fourni d'un détail d'objet non conforme au besoin final		Les responsabilités autour du projet doivent être définies en amont, par un Manager BIM et un chef de projet avec les autres acteurs du projet
Livrable fourni d'un détail d'objet non conforme au besoin final		Des contrôles hebdomadaires doivent être effectués sur l'ensemble des livrables produits par un Manager BIM ayant minimum 3 ans d'expériences dans le domaine
Collaboration non organisée affectant la qualité des modèles 3D produits		Définition de la collaboration en amont du projet Limitation d'accès à la plateforme collaborative Exigence de traçabilité lié à n'importe quel changement effectué dans la plateforme collaborative
Outils de modélisation utilisés sont non puissant pour avoir le détail adéquat au besoin final sur certains objets 3D		Outils de modélisation des voies : Outils de modélisation des rails : Géométrie rail Outils de modélisation des pentes et dénivelées : Outils de modélisation des caténaires : Outils de modélisations des quais : Outils de modélisation du site topographique :
Livrable fourni d'un détail d'objet non conforme au besoin final		L'organisation de l'équipe de projet doit être effectuée par un Manager BIM ayant 3 ans d'expérience minimum
Nettoyage agressif		Le nettoyage d'un nuage de points doit être effectué par un Manager BIM ayant minimum 3ans d'expériences
Nettoyage insuffisant		Le nettoyage d'un nuage de points doit être effectué par un Manager BIM ayant minimum 3ans d'expériences

357

358 **V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES:**

359 Cette communication présente une analyse globale de la MT-BIM. La démarche est basée sur une analyse de sécurité de la
 360 méthodologie en utilisant le principe d'acceptation de risque « estimation du risque explicite » et en adoptant un processus
 361 d'acceptation de sécurité permettant d'allouer des exigences d'intégrité de sécurité fonctionnelle de la méthodologie BIM. La
 362 méthodologie consiste à analyser des enquêtes effectuées pour déterminer une liste la plus exhaustive possible des erreurs que
 363 les acteurs du BIM peuvent commettre durant chacune des étapes menant à produire un modèle 3D en BIM. L'objectif est de
 364 proposer l'utilisation de celle-ci pour régler des problématiques liées à la sécurité dans le secteur ferroviaire.

365 Cette initiative est particulièrement pertinente compte tenu des défis complexes auxquels est confrontée l'industrie ferroviaire
366 en matière de sécurité. Dans cette discussion, nous examinerons les forces, les limites de la méthodologie proposée dans cet
367 article ainsi que les perspectives liées à cette recherche.

368

369 Une qualité majeure de notre étude est sa crédibilité puisque le principe d'acceptation des risques défini dans la EN NF 50 126
370 documente toutes les méthodes pour déterminer les exigences de sécurité et leurs exigences d'intégrité de sécurité pour juger un
371 système « de sécurité / sûreté de fonctionnement ». Notre méthode d'analyse permet déjà de convaincre les professionnels de la
372 sécurité ferroviaire que notre MT-BIM proposée est d'un niveau de sécurité adaptée pour leur permettre une partie des
373 démonstrations de sécurité (sûreté de fonctionnement) ferroviaire, notamment pour digitaliser une partie des tests sur site (réel).
374 De plus, l'utilisation de différentes analyses de sécurité, affinées et améliorées au fur et à mesure des échanges (interviews,
375 entretiens, etc.) effectués auprès des experts métiers permet d'identifier un grand ensemble de risques liés à l'usage du BIM dans
376 leurs méthodologies d'entreprise.

377 La difficulté principale de cette étude est l'absence de MT-BIM définie. En effet, chaque entreprise travaille avec sa propre
378 méthodologie et est généralement confidentielle pour assurer leur compétitivité sur un marché de niche dont la transformation
379 digitale amène à l'apparition de nombreux concurrents internationaux qui n'ont pas les mêmes exigences de qualité qui entraînent
380 un surcoût pour de moindre risque des projets ferroviaires (d'où l'importance des normes légales tels que EN50 126, etc.). Aussi,
381 l'absence de retours d'expériences lié aux risques fonctionnels de la méthodologie BIM, notamment dans le domaine du
382 ferroviaire qui est très complexe contrairement à ce qui se fait dans le bâtiment.

383 L'ensemble des analyses de sécurité a été réalisé par un retour d'expériences récolté par les différents échanges effectués avec
384 un nombre limité de professionnels BIM et de la sécurité ferroviaire (sur un marché nationale de niche devenant européen par
385 l'internationalisation commune des procédés industriels et services de ce secteur, ayant des contraintes de confidentialité / secret
386 des affaires entre donneur d'ordre tels que les pouvoirs publics ferroviaire et les répondants aux appels d'offre tels que les
387 entreprises des grands constructeurs jusqu'à leurs PME prestataires). Il est clair que dans ce cas l'exhaustivité de l'étude et des
388 analyses est conditionnée par les réponses des professionnels.

389 Notre méthodologie 2023 proposée pourra être améliorée. Par exemple, notre équipe de recherche continue à exploiter l'Arbre
390 de Défaillance pour évaluer les risques et évaluer la probabilité de survenue de l'évènement redouté dans la prochaine version
391 de notre méthodologie pour qu'elle soit commune à tous les experts métiers BIM sur des projets ferroviaires exigeant des tests
392 de sécurité sur site (des démonstrations de sûreté de fonctionnement). Une partie pourra être digitaliser pour aider à la décision
393 et pour réduire le nombre de tests sur site en corrigeant en amont du processus les données, plutôt que de s'en rendre compte des
394 erreurs qu'une fois sur site. Une liste finale d'exigences de sécurité sera mise en place et nous entamons des études de cas afin
395 d'effectuer une vérification complète de la méthodologie à base d'un modèle BIM sur des gares ferroviaires existantes avec des
396 experts du secteur qui en ont la responsabilité. Ceci nous permettra d'affiner l'analyse précédente et de démontrer l'apport de la
397 3D BIM pour faire de la sécurité ferroviaire.

398

399

REMERCIEMENTS

400 Nous tenons à remercier l'ensemble des répondants aux enquêtes menées et aux entretiens effectués qui nous ont permis les
401 résultats de cette étude. Les auteurs remercient les différents collaborateurs qui aident de près ou de loin pour assurer
402 l'avancement de projet, notamment Morgane POT (Team Manager chez Vulcain Ingénierie, service sûreté de fonctionnement et
403 soutien logistique intégré) et le Dr. Jérémy PATRIX (Responsable R&D chez le laboratoire Opal Research).

404

405

REFERENCES

- 406 Andrej matejov, janka šestáková. (2021). The experiences with utilization of bim in railway infrastructure in slovak republic and czech republic, (les
407 expériences d'utilisation du bim dans les infrastructures ferroviaires en république slovaque et en république tchèque, transportation research procedia), Volume
408 55, Pages 1139-1146, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.084>
- 409 Barbieri, G. and Fantuzzi, C. (2016). Design of cyber-physical systems : Definition and metamodel for reusable resources, (Conception de systèmes cyber-
410 physiques : Définition et métamodèle de ressources réutilisables). In 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation
411 (ETFA), 1–9.
- 412 Bensalah, M. (2022). BIM au ferroviaire - proposition de plan d'actions par analyse multicritère [thèse de doctorat, Université Ibn Tofail, Kentira-Maroc],
413 https://www.researchgate.net/publication/363739757_BIM_au_ferroviaire_-_proposition_de_plan_d_actions_par_analyse_multicritere.
- 414 Bradley, A., Haijiang, L., Lark, R., Dunn, S. (2016). BIM for Infrastructure : An Overall Review and Constructor Perspective (BIM pour les infrastructures :
415 un examen global et le point de vue du constructeur). 71, pp. 139-152. <https://scencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051630173X>
- 416 Biancardo, SA. (2021). Approche BIM basée sur la modélisation procédurale pour la conception ferroviaire. Journal des transports avancés, 2.
- 417 David Camarazo, Sana Debbech, Ana Roxin, Annabelle Gillet. (2023). Modélisation des systèmes ferroviaires -objectifs, approches et problématiques. eduBIM
418 2023 - 9e édition des Journées de l'enseignement et de la recherche autour du BIM et de la maquette numérique, Université de Bourgogne, , Dijon, France.
419 hal-04353184
- 420 Eydieux, J., Tillement, S. & Journé, B. (2018). Discuter la sûreté et sa démonstration : négocier ce qui fait preuve. Négociations, 30, 37-
421 52. <https://doi.org/10.3917/neg.030.0037>
- 422 Gordo Gregorio, P. (2023). La continuité informationnelle dans les projets BIM, de la conception à la gestion du bâtiment : une analyse du système d'acteurs.
423 [Thèse de doctorat, Hesam Université]. <https://theses.hal.science/tel-04167158>
- 424 Helfrich V., Romestant F., (2015). Achats public et développement durable entre compatibilités et frictions de paradigme et de pratiques : le cas de l'industrie
425 du transport ferroviaire. Management International Vol.20, N°15, pp.78-93.

426 Jack C.P. Cheng, Qiqi Lu, Yichuan Deng, Analytical review and evaluation of civil information modeling (Examen analytique et évaluation de la modélisation
427 de l'information civile), Automation in Construction, Volume 67,2016, Pages 31-47,
428 Marco Häußler, Sebastian Esser, André Borrmann, (2021). Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN (Vérification
429 de la conformité au code des conceptions ferroviaires en intégrant BIM, BPMN et DMN), Automation in Construction, Volume 121, 103427, ISSN 0926-
430 5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103427>.
431 Marco Pasetto, Andrea Giordano, Paolo Borin, Giovanni Giacomello. (2020), Integrated railway design using Infrastructure-Building Information Modeling.
432 The case study of the port of Venice (Conception ferroviaire intégrée à l'aide de la modélisation des informations sur les bâtiments d'infrastructure. L'étude
433 de cas du port de Venise), Transportation Research Procedia, Volume 45, Pages 850-857, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.084>.
434 Meng Li, Hongliang Yu, Hongyu Jin, Ping Liu. (2018), Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM (Méthodologies de
435 contrôle des risques de sécurité pour la construction du métro chinois basées sur le BIM). Safety Science, Volume 110, Part A, 418-426, ISSN 0925-7535,
436 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.026>. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.026>
437 Sacks.R. (2013). Modern Construction : Lean Project Delivery and Integrated Practices (Construction moderne : réalisation de projets Lean et pratiques
438 intégrées), Construction Management and Economics, 31 :4, 394-396, DOI : 10.1080/01446193.2013.763999
439 Vignali, V, Ennia Mariapaola Acerra, Claudio Lantieri, Federica Di Vincenzo, Giorgio Piacentini, Stefano Pancaldi. (2021). Building information Modelling
440 (BIM) application for an existing road infrastructure (Application de modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour une infrastructure routière
441 existante), Automation in Construction, Volume 128, 103752, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103752>.
442 Afnor éditions. (2017). Applications ferroviaires – Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité
443 (FDMS) - Partie 1 : Processus FMDS générique. NF EN 50 126-1.
444 Afnor éditions. (2017). Applications ferroviaires – Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité
445 (FDMS) -Partie 2 : Approche système pour la sécurité. NF EN 50 126-2.
446 Afnor éditions. (2017). Applications ferroviaires - Gabarits - Partie 3 : gabarit des obstacles. NF EN 15273-3+A1
447 <https://numerique.sncf.com/actualites/sncf-reseau-leader-dans-le-bim-et-le->
448 [jumeau-numerique-du-systeme-ferroviaire/](https://numerique.sncf.com/actualites/sncf-reseau-leader-dans-le-bim-et-le-jumeau-numerique-du-systeme-ferroviaire/)