



HAL
open science

Proposition d'un jumeau numérique pour soutenir la gestion de l'exploitation d'une infrastructure linéaire

Yvan Tchana de Tchana

► To cite this version:

Yvan Tchana de Tchana. Proposition d'un jumeau numérique pour soutenir la gestion de l'exploitation d'une infrastructure linéaire. Infrastructures de transport. Université de Technologie de Troyes, 2021. Français. NNT : 2021TROY0012 . tel-03808753

HAL Id: tel-03808753

<https://theses.hal.science/tel-03808753v1>

Submitted on 10 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Yvan TCHANA DE TCHANA

**Proposition
d'un jumeau numérique pour
soutenir la gestion de l'exploitation
d'une infrastructure linéaire**

Champ disciplinaire :
Sciences pour l'Ingénieur

2021TROY0012

Année 2021

THESE
pour l'obtention du grade de
DOCTEUR
de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES
en SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Spécialité : MATERIAUX, MECANIQUE, OPTIQUE, NANOTECHNOLOGIE

présentée et soutenue par

Yvan TCHANA DE TCHANA

le 18 mars 2021

**Proposition d'un jumeau numérique pour soutenir la gestion
de l'exploitation d'une infrastructure linéaire**

JURY

M. Benoît EYNARD	ENSEIGNANT CHERCHEUR UTC - HDR	Président
M. Vincent CHEUTET	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. Christophe MERLO	PROFESSEUR ESTIA - HDR	Rapporteur
Mme Pascale MARANGÉ	MAITRE DE CONFERENCES	Examinatrice
M. Guillaume DUCCELLIER	PROFESSEUR ASSOCIE UTT	Directeur de thèse
M. Sébastien REMY	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directeur de thèse

Personnalités invitées

M. Maxime CASSÉ	INGENIEUR - INETUM
M. Judicaël DEHOTIN	INGENIEUR, DOCTEUR - SNCF RESEAU

Résumé

La croissance du numérique au sein l'industrie de la construction conduit au BIM (Building Information Modeling). Inspiré du bâtiment, le BIM est adopté plus tard sur des projets d'infrastructure linéaire. Ces projets nécessitent une maîtrise de bout en bout de la chaîne d'information. Le PLM (Product Lifecycle Management) favorise cette continuité numérique dans l'industrie manufacturière. Des études expérimentent une utilisation complémentaire des approches BIM et PLM pour ce type de projet. Adaptant des méthodes développées pour la construction de bâtiments, ces études se limitent à l'élaboration de référentiels de données. Cela rend difficile la gestion de l'infrastructure dans sa phase d'usage, où la maquette numérique doit devenir un jumeau numérique.

Ces présents travaux consistent à développer une stratégie pour la conception, la mise en œuvre et l'exploitation d'une infrastructure linéaire. Cible de la démarche, le jumeau numérique intégrera non seulement BIM et PLM, mais aussi toute autre source d'information qui resitue l'infrastructure dans son environnement. Agrégateur de données, il devrait permettre d'assurer la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Ce système est éprouvé sur une infrastructure linéaire particulière, un passage à niveau. La continuité numérique et la traçabilité des données sont des facteurs importants pour un tel ouvrage. Notre proposition permet de suivre l'évolution de la donnée, et de lier des données d'exploitation aux données de conception et de construction de l'infrastructure.

Mots-clés : Modélisation des données du bâtiment, Produits commerciaux -- Cycle de vie -
- Gestion, Travail collaboratif, Projet d'infrastructure, Jumeau numérique.

English Title

Digital twin proposal to support linear infrastructure operations management.

Abstract

The digital growth of the construction industry led to BIM (Building Information Modeling). Developed for buildings, BIM is later used on linear infrastructure projects. Such projects require end-to-end control of information. PLM (Product Lifecycle Management) supports digital continuity in the manufacturing industry. Studies evaluate the relevance of a complementary use of the BIM and PLM approaches for linear infrastructure projects. With an adaptation of methods used for building construction, those studies are mostly restricted to the implementation of data repositories. This makes it difficult to consider the infrastructure post-construction phase, where the 3D model is no longer a digital model, but a digital twin.

This research work consists in developing a strategy for the design, the implementation and the operations and maintenance of a linear infrastructure. The digital twin of the infrastructure is the target of our approach. It will take into consideration not only BIM and PLM methodologies, but also any other data source positioning the infrastructure in its geographical environment. Data aggregator, our digital twin should make it possible to manage the lifecycle of a linear infrastructure. This system is tested on a specific linear infrastructure, a level crossing. Digital continuity and data traceability are important factors for those constructions. Through the digital twin, our proposal helps to follow the data, and thus to link operational data to the design and construction data of the linear infrastructure.

Keywords : Building Information Modeling, Product life cycle--Management, Collaborative engineering, Infrastructure project, Digital twin.

Comme un témoignage de ma sincère considération,

A mon papa, à ma maman

A ma sœur, à mon frère

A ma famille, à mes proches

A mes amis

Je vous dédie ce travail.

A la mémoire de mon défunt oncle « Papa » Roger

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de trois années de collaboration entre l'Université de Technologie de Troyes et l'entreprise INETUM. Avant tout développement, il m'est inévitable de remercier ces institutions ainsi que tous les acteurs qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation et l'aboutissement de ce projet de thèse.

A tout seigneur, tout honneur. Je tiens à remercier chaleureusement mon équipe encadrante : Guillaume DUCELLIER, mon directeur de thèse pour la confiance qu'il m'a accordée depuis mon stage de fin d'études qui a abouti à cette thèse CIFRE ; Sébastien REMY, mon co-encadrant dont la disponibilité a été un des facteurs clés ; sans oublier Maxime CASSE, mon tuteur en entreprise, ton accompagnement professionnel et industriel m'a été indispensable. Votre complémentarité, vos compétences scientifiques, ainsi que vos qualités humaines ont été déterminantes pour la réussite de ce projet. Je n'oublie pas ces moments de doute au cours desquels votre soutien et vos orientations m'ont redonné de la motivation.

Ma gratitude à l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils ont bien voulu me faire et l'intérêt porté à mes travaux, en particulier aux deux rapporteurs, Christophe MERLO et Vincent CHEUTET, pour le temps minutieux accordé à l'évaluation de ce présent mémoire.

En envoyant toute ma reconnaissance à la Business Unit PLM/Industrie 4.0 d'INETUM pour cette opportunité, je pense à deux collègues en particulier : François TRIBOUILLOIS qui a eu l'idée de mettre en place ce dispositif de thèse en entreprise, & Piers BARRIOS pour son aide et ses encouragements quotidiens. Je remercie également toute l'équipe dirigeante d'INETUM PLM/Industrie 4.0, mes différents chefs de projet, pour leur compréhension et leur patience vu le contexte de travail ; et d'une manière générale tous mes collègues pour leurs encouragements et le cadre de travail sain et amical dans lequel j'ai eu la chance d'évoluer.

Ma famille - spécialement Papa, Maman, ma sœur Ornella, mon frère Hermann, Tata Valérie - votre soutien inconditionnel m'amène à vous renouveler mon affection. Je tiens à vous rappeler que vous êtes mes plus grandes forces et richesses. Merci d'avoir toujours été là pour moi. J'ai également une forte pensée pour mes amis, vos divers conseils, vos ondes positives ainsi que vos encouragements, notamment au cours de la dernière année de thèse, m'ont façonné et donné assez de force pour venir à bout de ce projet. Ma réussite est également la vôtre. J'adresse par ailleurs mes remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à ces travaux de thèse et que j'aurais omis de citer.

Table de matières

Résumé	1
English Title	2
Abstract	2
Remerciements	4
Table de matières	5
Glossaire	10
0. Introduction Générale	12
0.1. Contexte de la recherche.....	12
0.1.1. Les Entreprises de Services Numériques et le PLM	12
0.1.2. PLM : de l'aéronautique au manufacturier, du manufacturier à la construction. 13	
0.1.3. Lancement de la thèse CIFRE	14
0.2. Problématique	15
0.3. Organisation du document.....	17
0.3.1. Périmètre de l'étude	17
0.3.2. Démarche projet	17
0.3.3. Plan du mémoire	19
I. Contexte Industriel	21
1.1. L'industrie manufacturière et le Product Lifecycle Management PLM.....	22
1.1.1. Les verrous de l'industrie manufacturière avant le PLM	22
1.1.2. L'avènement du PLM.....	23
1.1.3. Le PLM pour une transformation numérique industrielle	23
1.2. L'industrie de la construction.	24
1.2.1. Les acteurs.....	25
1.2.2. Les particularités d'un projet de construction	25
1.2.3. Enjeux et contraintes	26
1.2.4. La répartition des coûts par phase.....	28

1.3.	Réponse au besoin de transition numérique : l'avènement du BIM	28
1.3.1.	Historique	28
1.3.2.	Définitions	30
1.3.3.	Building Information Model ou la maquette numérique.....	30
1.3.4.	Building Information Modeling	32
1.3.5.	Les niveaux de maturité du BIM	33
1.3.6.	Les avantages du BIM.....	34
1.4.	La place des infrastructures linéaires au sein de la construction	35
1.4.1.	La part des infrastructures linéaires.....	35
1.4.2.	Les spécificités d'une infrastructure linéaire	37
1.5.	Problématique de gestion de données dans le temps	39
	Conclusion	40
II.	Etat de l'art.....	42
2.1.	BIM : Du bâtiment aux infrastructures linéaires.	42
2.1.1.	Enjeux	42
2.1.2.	Les impacts du BIM	43
2.1.3.	L'adoption du BIM	45
2.1.4.	BIM : Collaboration à travers des outils interopérables	47
2.1.5.	Usages du BIM	49
2.2.	PLM : Du produit aux infrastructures linéaires	52
2.3.	Approches issues de deux secteurs économiques différents	53
2.4.	Comparaison BIM et PLM	54
2.5.	Jumeau numérique	56
2.5.1.	Définitions du jumeau numérique	56
2.5.2.	Evolutivité du jumeau numérique.....	57
2.5.3.	Du BIM au jumeau numérique	59
	Conclusion & contributions vis-à-vis de l'état de l'art	61
III.	Gestion du cycle de vie d'infrastructure linéaire	63
3.1.	Structuration de données et acteurs.....	63
3.1.1.	Structure « Produit »	64
3.1.2.	Positionner les acteurs et leurs besoins.....	69
3.2.	La notion de cycle de vie	70

3.2.1.	Cycle de vie d'un produit.....	71
3.3.	Le cycle de vie d'un projet d'infrastructure linéaire	74
3.3.1.	Importance de la phase de conception.....	75
3.3.2.	Continuité avec la phase de construction.....	76
3.3.3.	Criticité de la phase d'exploitation et maintenance.	76
3.4.	Cycle de vie de l'information sur un projet d'infrastructure linéaire.....	77
3.5.	Besoins de systèmes complémentaires GMAO, SIG, IoT.....	78
3.5.1.	Les Systèmes d'Information Géographique	79
3.5.2.	Internet of Things, les objets connectés	80
3.5.3.	GMAO	80
3.6.	Du cycle de vie, des process aux exigences du système de gestion	82
	Conclusion	83
IV.	Adaptation des concepts et proposition d'un modèle de jumeau numérique pour des infrastructures linéaires.....	85
4.1.	Utilisation conjointe du BIM et PLM pour des infrastructures linéaires.....	85
4.2.	Jumeau numérique d'une infrastructure linéaire	87
4.2.1.	Définition de notre jumeau numérique d'infrastructure linéaire.....	87
4.2.2.	Utilisation d'un jumeau numérique unique	88
4.3.	Jumeau numérique unique.....	88
4.4.	Gestion de la maturité des données du jumeau numérique	92
4.4.0.	AsDefined	93
4.4.1.	AsDesigned	94
4.4.2.	AsPlanned	94
4.4.3.	AsBuilt.....	95
4.4.4.	InService	95
4.5.	Approches pour la représentation numérique d'une infrastructure réelle	96
4.5.1.	Représentation fonctionnelle d'une infrastructure réelle.....	97
4.5.2.	Représentation physique à grande échelle d'une infrastructure réelle	97
4.5.3.	Nouvelle approche complémentaire : une approche basée sur des cas d'usages.	98
	Conclusion	102
V.	Expérimentation sur passage à niveau	104
5.1.	Définitions et considérations techniques.....	104

5.1.1.	Définition	105
5.1.2.	Objet de l'étude : passage à niveau de Romilly-sur-Seine	107
5.2.	Analyse système	108
5.2.1.	Décomposition produit	109
5.2.2.	Fonctionnement général	110
5.2.3.	Acteurs autour des PN.....	111
5.2.4.	Cycle de vie.....	113
5.3.	Problématique métier : Sécurité	114
5.3.1.	Dangers et accidents	115
5.3.2.	Sécurisation et enjeux	115
5.3.3.	Possibilité de mise en place des recommandations	116
5.4.	Spécifications de la maturité du jumeau numérique	116
5.5.	Scénario global d'évolution de la plateforme jumeau numérique.	119
5.5.1.	Les activités de conception	120
5.5.2.	Les activités de construction	120
5.5.3.	Les activités d'exploitation et maintenance	120
5.5.4.	Scénario global	121
5.6.	Les cas d'usages du scénario global	124
5.6.1.	UC1 - Proposition alternatives Design.....	124
5.6.2.	UC2 - Sélection alternative design	124
5.6.3.	UC3 - Validation d'une alternative	125
5.6.4.	UC4 - Réalisation des travaux.....	126
5.6.5.	UC5 - Connexion de la plateforme Jumeau Numérique au PN.....	126
5.6.6.	UC6 - Détection de panne	127
5.6.7.	UC7 - Analyse d'impact des matériels similaires sur d'autres PN.....	128
5.6.8.	UC8 - Maintenance du PN	128
5.6.9.	UC9 - Modification du PN liée à des constructions alentours du passage à niveau 129	
5.7.	Les process métiers issus du scénario global	131
5.7.1.	Process 0 : Reverse engineering.....	131
5.7.2.	Process 0' : Réingénierie des données de conception et construction	131
5.7.3.	Process d'exploitation et maintenance.....	131
5.7.4.	Process d'analyse et modification de l'existant.....	133
	Conclusion	134

Conclusion Générale et Perspectives	136
Contenu et apports de la thèse	136
Limites.....	137
Perspectives.....	138
Bibliographie.....	140
Annexes	154
A. Typologie des passages à niveau	154
Liste des figures	159
Liste des tableaux	161

Glossaire

- **AMO** : Assistant à Maîtrise d’Ouvrage
- **APD** : Avant-Projet Détaillé
- **APS** : Avant-Projet Sommaire
- **BET** : Bureau d’Etudes Techniques
- **BIM** : Building Information Model, Modeling, Management
- **BTP** : Bâtiment et Travaux Publics
- **BU** : Business Unit
- **CIFRE** : Convention Industrielle de Formation par la Recherche
- **ESN** : Entreprise de Services du Numérique
- **GMAO** : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
- **IDM** : Information Delivery Manual
- **IFC** : Industry Foundation Class
- **IFD** : International Framework for Dictionaries
- **IIoT** : Industrial Internet of Things
- **IoT** : Internet of Things
- **Loi MOP** : Loi relative à la Maîtrise d’Ouvrage Publique et à ses rapports avec la Maîtrise d’Œuvre Privée
- **MINnD** : Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables, projet national
- **MOA** : Maîtrise d’Ouvrage
- **MOE** : Maîtrise d’Œuvre
- **O&M** : Operations & Maintenance, phase d’exploitation et maintenance d’un ouvrage
- **PLM** : Product Lifecycle Management
- **PN** : Passage à Niveau
- **RA/RV/RM** : Réalité Augmentée, Réalité Virtuelle, Réalité mixte.
- **SIG** : Système d’Information Géographique
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de Fer Français
- **UTT** : Université de Technologie de Troyes

Introduction Générale

0. Introduction Générale

0.1. Contexte de la recherche

0.1.1. Les Entreprises de Services Numériques et le PLM

Voilà plusieurs décennies que les Entreprises de Services Numériques accompagnent l'industrie manufacturière dans sa transformation numérique, au travers de nouvelles méthodologies, de nouveaux concepts et outils tels que la Gestion du Cycle de Vie Produit, plus communément appelée PLM (Product Lifecycle Management). Les entreprises manufacturières évoluent depuis longtemps dans un environnement compétitif. Répondre à la concurrence devient un enjeu majeur pour ces industries. Celles qui se démarquent sont celles qui ont su développer des marchés nouveaux, qui ont réussi à mettre à disposition les produits au plus tôt (en réduisant les temps et coûts de développement et en rationalisant les flux de production), ou encore celles qui ont été capables de renouveler rapidement les gammes de produits (en innovant pour répondre à l'évolution des besoins). En assurant une maîtrise et une gestion des processus, ces entreprises se focalisent sur le produit et sa description, c'est-à-dire l'ensemble des données relatives à sa définition, son développement, sa production, son utilisation, etc. Composante commune à l'ensemble des processus d'entreprise et d'ingénierie, le produit suit une évolution dans le temps, loin d'être linéaire, répondant à des objectifs parfois contradictoires. En effet, le processus d'ingénierie intègre de multiples expertises, dont la communication n'est pas toujours assurée. En plus des critères qualité, coût, délai, les produits sont soumis à diverses contraintes telles que des normes industrielles, normes environnementales, de sécurité, et de confort. Les besoins industriels continuent ainsi à pousser la refonte du processus d'ingénierie vers des démarches concourantes. Il est désormais question de mieux gérer l'évolution des données du produit tout au long des processus métiers d'entreprises, dans l'optique de faciliter les échanges.

Inetum, ESN (Entreprise de Services du Numérique) française, est un acteur majeur dans le domaine du PLM. Elle totalise une expérience de plus de 15 ans dans le conseil, l'intégration et le maintien en conditions opérationnelles de solutions PLM. En se focalisant originellement sur les industries aéronautiques, l'approche stratégique PLM apporte une réponse à aux enjeux industriels précédemment évoqués. Le PLM est un ensemble de méthodes et de logiciels permettant de gérer les données des produits industriels au cours de leur vie, c'est-à-dire depuis l'établissement du cahier des charges jusqu'en fin de vie. Il consiste à capitaliser toutes les informations d'un produit, et permet aux différentes entités de l'entreprise de partager les informations associées au cycle de vie du produit. Incluant des fonctionnalités de gestion de données techniques, les plateformes PLM sont garants du patrimoine informationnel du produit. Elles permettent la diffusion des informations, le contrôle d'accès, ainsi que l'évolution des données dans l'ensemble des processus industriels.

0.1.2. PLM : de l'aéronautique au manufacturier, du manufacturier à la construction.

Après le secteur aéronautique, le PLM s'est peu à peu installé dans le secteur automobile, avant de s'adresser à d'autres secteurs tels que le spatial, le naval et l'énergie. Forts de ses compétences en gestion du cycle de vie dans ces industries, Inetum (anciennement GFI Informatique) souhaite désormais repenser ses gammes de services aux industriels, et plus précisément à ceux qui connaissent une transformation numérique. C'est le cas de l'industrie AIC (Architecture, Ingénierie et Construction), ou l'industrie des BTP (Bâtiment et Travaux Publics) qui entame aujourd'hui sa transformation numérique.

Parallèlement au PLM, l'industrie de la construction a vu ces dernières années se développer le BIM (Building Information Modeling). Il s'agit d'une approche méthodologique visant à favoriser l'intégration d'équipes pluridisciplinaires dans les projets de bâtiment, d'urbanisme et de gestion du patrimoine. Ce système de gestion est en réalité basé sur la collaboration de plusieurs acteurs dans les différentes phases du cycle de vie. Il permet de saisir les ouvrages¹ existants, de monter l'opération et la conception d'un ouvrage, d'exécuter le chantier, et d'exploiter et gérer le patrimoine. Bien que le BIM s'efforce à s'appliquer à toute l'industrie de la construction, il est, comme son nom l'indique, originaire du bâtiment, et ne répond que partiellement aux infrastructures linéaires. Le qualificatif « linéaire » vient du fait que la linéarité et la longueur influencent la structuration du projet sur lequel interagissent fortement les conditions géotechniques et topographiques. La plupart des infrastructures linéaires se situent dans le secteur des transports urbains ou interurbains (route, autoroute, rail-route, tramway, métro, réseaux).

Bien que PLM et BIM se rejoignent sur plusieurs points (gestion de cycle de vie, maquette numérique centralisée, partage de la donnée), il s'agit de deux notions différentes. Si les avantages du PLM sont assez éprouvés et partagés, le BIM reste une notion assez récente dont l'efficacité et l'impact restent à prouver aux yeux de certains industriels. Ces deux approches ont fait l'objet de multiples études de complémentarité visant à évaluer la pertinence de l'utilisation de l'approche PLM pour l'amélioration des fonctionnalités du BIM [Jupp et Nepal 2014; Ford et al. 2013]. Les travaux concluent à une complémentarité forte et proposent des résultats encourageants pour l'amélioration de la méthodologie BIM via la récupération de pratiques issues de l'expérience des acteurs du PLM, notamment pour la formalisation des processus de validation, d'échange et de modification du référentiel d'information [Gunpinar et Han 2008]. Force est de constater que ces travaux couvrent principalement le bâtiment et s'intéressent peu aux grandes infrastructures industrielles. En particulier, il existe peu de références abouties sur les méthodologies de gestion des infrastructures dites linéaires. Les recherches visant à proposer des solutions BIM adaptées à ces infrastructures existent cepen-

¹ Le terme « ouvrage » dans cette thèse concerne les bâtiments et les infrastructures linéaires, sans distinction.

dant, pour chaque grand domaine d'activité [Dave et al. 2013]. A titre d'exemple, nous pouvons citer les infrastructures autoroutières [Sibert 2013], les chemins de fer [Rezgui et al. 2013] et les installations de production et de transport d'énergie [Ward et al. 2014].

0.1.3. Lancement de la thèse CIFRE

Le dispositif CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) est un moyen particulier de financer une thèse. Il permet à une entreprise française de bénéficier d'une aide financière pour recruter un jeune chercheur-doctorant dont les travaux de recherche, encadrés par un laboratoire public de recherche, conduisent à la soutenance d'une thèse. C'est l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) qui valide le dispositif CIFRE après la signature de trois contrats : un contrat de travail (entre le doctorant et l'entreprise, un contrat de thèse (entre le doctorant et le laboratoire de recherche), et un contrat de collaboration (entre le laboratoire et l'entreprise).

L'absence de développement de méthodologie de gestion d'infrastructures linéaires est liée aux caractéristiques intrinsèques de l'infrastructure linéaire [Terzi et al. 2010]. Comparées à d'autres produits manufacturés ou alors un bâtiment, les infrastructures linéaires répondent à certaines spécificités, comme l'influence majeure de l'existant (sol naturel, géotechnique du sous-sol, etc.), et le fait que l'environnement naturel local dans lequel s'insère l'œuvre n'est pas connu avec précision. Cependant, les objets créés sont liés à cet environnement. Leur définition doit donc prendre en compte cette incertitude et s'adapter à l'évolution de la qualité des données collectées. La construction de l'infrastructure dépend fortement de nombreux risques. Par exemple, la météorologie est une donnée fondamentale de la construction des objets d'excavation. Ces particularités des infrastructures linéaires sont à l'origine de plusieurs initiatives visant à proposer un modèle de gestion de ces types d'ouvrage. Parmi elles, le projet MINND (Modélisation d'Informations Interopérables pour des Infrastructure Durables). Il a pour objectif de favoriser le développement du BIM pour les infrastructures en améliorant la structuration des données des projets pour des échanges et partages des informations plus efficaces.

En s'intéressant à sa transformation numérique, Inetum étend ses activités au domaine de la construction en devenant un contributeur du projet MINND. Elle y découvre des problématiques de gestion de données semblables à celles qu'a connues l'industrie manufacturière. En y voyant une opportunité de service, elle se propose d'essayer de répondre à ces problématiques à travers cette thèse CIFRE, en collaboration avec le laboratoire LASMIS (Life Assessment of Structures, Materials and Integrated Systems) de l'UTT (Université de Technologie de Troyes). A son lancement, l'objectif de la thèse est ainsi de proposer et déployer des méthodologies et outils numériques basés sur le PLM, qui vont apporter une réelle valeur ajoutée à la gestion de cycle de vie d'une infrastructure linéaire dans ses phases d'usage. En sortant du domaine manufacturier, l'intérêt de cette thèse pour Inetum, et a fortiori pour toutes les

ESN, est donc de justifier la possibilité d'appliquer le PLM (méthodologies, fonctionnalités et services liés) au domaine de la construction.

0.2. Problématique

Les infrastructures linéaires diffèrent des produits manufacturés et des bâtiments. Une des différences est la répartition des coûts au cours du cycle de vie. Par exemple, les phases de conception et construction sont généralement les moins coûteuses pour une infrastructure linéaire, contrairement aux produits manufacturés, où les efforts sont plus concentrés en conception. Le coût global augmentant en fonction des phases du projet d'infrastructure, une erreur commise en conception peut impacter négativement la suite du projet, notamment en termes de coût et de délai. La phase d'exploitation et de maintenance s'avère être la plus longue (plus d'une centaine d'années pour certaines structures) et donc la plus chère. Des économistes de la construction l'évaluent elle seule à 75% du coût global de l'infrastructure dans son cycle de vie. Il est donc nécessaire d'impliquer en amont les exigences et acteurs de la phase O&M. Un autre point de différence est la propriété. Si les produits manufacturés et bâtiments sont possédés et construits par des entreprises privées, des particuliers ou même à l'Etat via des collectivités, la propriété et la responsabilité de la plupart des infrastructures linéaires reviennent principalement à l'Etat. Celui-ci peut faire appel à des entreprises de concession ou entreprises parapubliques pour s'assurer de la gestion, l'exploitation et la maintenance desdites infrastructures. Certaines réglementations distinguent le constructeur, du propriétaire de l'ouvrage, ou encore de l'exploitant. Le bâtisseur est rarement le propriétaire final, qui n'est que rarement l'exploitant, qui n'est lui-même que rarement le mainteneur. Cette multiplicité d'acteurs successifs, couplée à la longueur des cycles de vie est à l'origine de la discontinuité numérique des données. Au-delà des enjeux d'innovation, de compétitivité et de développement durable, les projets d'infrastructures font face à des limites. Les phases d'un projet de construction, et donc d'une infrastructure, sont distinctes, avec pour chaque phase des acteurs différents, des outils différents. Il naît ainsi le besoin d'assurer une interopérabilité de données entre les différents outils numériques de travail. Aussi, cette multitude d'acteurs rend la compréhension du projet plus complexe, et peut retarder la livraison d'un projet. La ressaisie de données par chaque acteur est un facteur retardant. C'est pourquoi la mise en œuvre d'une logique de continuité numérique apparaît comme un facteur de gain à chacun des échelons.

Les possibilités d'application du PLM ou du BIM sur les infrastructures ne sont pas exhaustives. En effet, l'infrastructure linéaire diffère du produit manufacturier et du bâtiment. Etant donné que ni le BIM ni le PLM ne répondent de manière exhaustive aux exigences d'infrastructures linéaires, il n'est pas vrai de dire que le BIM peut être considéré comme le PLM des infrastructures linéaires. Leur gestion implique de multiples besoins en termes de gestion de données. Ces besoins sont partiellement couverts par les initiatives PLM et BIM en fonction

de la granularité du cycle de vie des données requises. Il est donc une opportunité d'investir un usage complémentaire des méthodologies BIM et PLM pour la conception, la mise en œuvre et l'exploitation d'une infrastructure linéaire. Cet usage complémentaire doit reposer sur une stratégie BIM enrichie des méthodologies et pratiques du PLM afin de prendre en compte les besoins spécifiques d'une infrastructure industrielle linéaire. Il devra alors couvrir les phases de représentation et de gestion d'informations de l'infrastructure, dans un environnement hétérogène multi-vues. Cet usage complémentaire BIM & PLM doit également être assez structuré pour assurer la continuité numérique du projet.

Il existe plusieurs possibilités pour répondre à cette complémentarité. L'une d'elle est l'ajout des fonctionnalités PLM dans un environnement BIM. Les limites connues sont la duplication de données, la perte de la référence de données causant ainsi une discontinuité numérique. Un autre moyen de soutenir cette complémentarité serait de puiser dans la phase de croissance numérique que l'industrie connaît actuellement. Elle traverse sa quatrième révolution, celle du numérique, c'est l'Industrie 4.0. Correspondant à de nouvelles façons d'organiser les processus de production, elle accélère l'innovation avec des technologies telles que Internet des Objets, Réalité Augmentée, Impression 3D, Intelligence Artificielle, Cloud Computing ou encore Jumeau Numérique ou Digital Twin. S'il existe plusieurs définitions plus ou moins uniformes, nous pouvons définir le jumeau numérique comme une représentation virtuelle d'un produit physique, d'un processus ou d'un système qui peut être utilisé à diverses fins (simulation, anticipation, prise de décision, maintenance...). L'essence d'un digital twin est la connexion et la synchronisation entre les données relatives au produit physique et les informations contenues dans le produit virtuel. Le produit virtuel ici est le produit conçu avec des technologies assistées par ordinateur.

La proposition de cette thèse en réponse à la problématique précédemment expliquée est l'usage complémentaire des notions PLM et BIM autour d'un jumeau numérique. Outre les fonctionnalités propres au PLM et au BIM (création et affichage de la 3D, structuration de données, travail collaboratif), la plateforme jumeau numérique constituera un outil de visualisation, de capitalisation et d'archivage des données. Ensemble, elles permettront de définir le projet, anticiper et diriger la construction, anticiper et améliorer la phase d'exploitation et maintenance (O&M). Les industriels devraient être capables de définir ex-nihilo les étapes de construction d'un projet et déterminer l'état dans lequel se trouve une infrastructure à un instant précis. L'objectif principal de la thèse sera de définir et de maintenir dans le temps un jumeau numérique d'une infrastructure linéaire reposant sur une structure de données et un ensemble de fonctions de transformation de ce jumeau.

0.3. Organisation du document

0.3.1. Périmètre de l'étude

Les infrastructures linéaires ont une grande diversité. On distingue principalement les infrastructures routières, les infrastructures ferroviaires, les ouvrages d'art (ponts) et tunnels, les canaux et voies navigables.

Chaque infrastructure est singulière. Dans chaque catégorie, il peut y avoir des sous-catégories en fonction de la composition de l'infrastructure proprement dite et de son environnement opérationnel. Ainsi les projets de construction de routes urbaines seront différents de celles des routes départementales ou nationales ; ou encore les contraintes d'un projet de réseau ferré à grande vitesse seront différentes des lignes classiques. Outre cette singularité certaines infrastructures en elles-mêmes sont une alliance de deux infrastructures. C'est le cas des tunnels par exemple. Un tunnel est construit pour faire passer une route et/ou un chemin de fer. Les contraintes de l'une influent forcément sur l'autre et cela rend les problématiques plus complexes et intéressantes. C'est dans cette logique que cette thèse limite son étude à une intersection entre une infrastructure routière et une infrastructure ferroviaire : le passage à niveau (PN). Sa conception, son entretien et son fonctionnement sont très critiques. La première raison évidente est due à l'interconnexion de deux systèmes complexes. Une autre raison importante, et non des moindres, est la sécurité. La sécurité au passage à niveau est devenue un enjeu majeur pour le Ministère du Transport en France. Plusieurs rapports ont été soumis pour l'amélioration de la sécurité des PN ou l'évaluation de la dangerosité des PN.

Il a été possible d'expérimenter le PLM dès la phase de conception d'un projet aéronautique et/ou automobile. Pareillement, l'expérimentation du BIM a pu se faire en début de projet. Certaines démonstrations ont joué l'utilisation du BIM en phase d'exploitation. Concernant l'utilisation conjointe des deux notions, aucune expérimentation n'inclut les deux dès le départ d'un projet. La connaissance n'est pas encore mature, et les premières expérimentations se font sur les produits, bâtiments ou infrastructures existantes. Le temps alloué à cette thèse ne permet pas de réaliser une expérimentation sur un projet à venir. L'objectif d'Inetum est de proposer une approche méthodologique au service de la transition numériques des organisations, afin de supporter l'exploitation et la maintenance d'une infrastructure linéaire. Pour faire correspondre les travaux de thèse aux besoins de l'entreprise, nous nous sommes limités à un cas d'étude théorique sur une infrastructure existante, le passage à niveau de Romilly-sur-Seine.

0.3.2. Démarche projet

Trois phases ont été abordées au cours de la thèse.

La première consistait à recueillir les besoins de gestion de l'information d'une infrastructure industrielle linéaire. Cette phase repose sur une étude auprès d'industriels identifiés

comme représentatif et ayant montré un intérêt fort pour le sujet. Nous nous sommes intéressés ici notamment aux exploitants des réseaux autoroutiers et ferroviaires français. Cette phase a été renforcée par les échanges liés par la participation au consortium de recherche MINnD (Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables).

La deuxième phase a servi à confronter les besoins identifiés aux solutions méthodologiques existantes pour la mise en œuvre des approches BIM et PLM. Nous nous sommes intéressés notamment aux approches développées par le laboratoire de recherche associé au projet de thèse et visant à réaliser une capture de l'existant pour l'enrichissement des jumeaux numériques, jusque-là appliqués aux produits manufacturés [Durupt et al. 2014] ou à des projets urbains [Zhu et al. 2015]. Nous avons cherché à appliquer ces approches aux infrastructures linéaires. La *Figure 0-1* présente la démarche mise en œuvre dans le domaine aéronautique et visant à assurer que l'écart, appelé défaut de maturité, entre le réel et son double numérique reste acceptable pour l'usage prévu. L'enjeu de cette phase des travaux de thèse a été d'évaluer l'usage de cette méthode pour les infrastructures linéaires et définir les manques et problèmes méthodologiques à adresser.

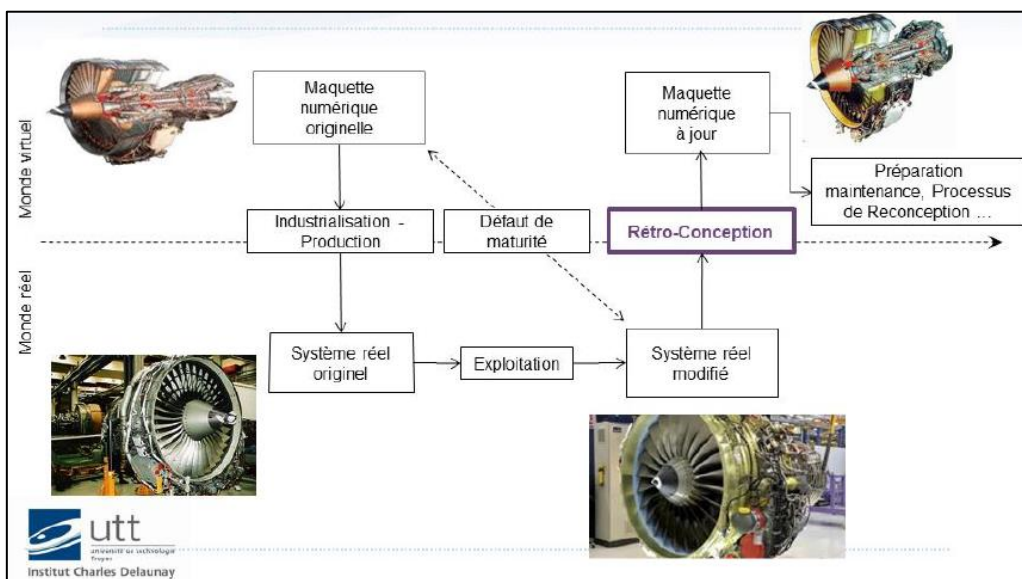


Figure 0-1 : Macro-processus de mise à jour d'un jumeau numérique

Dans la troisième phase des travaux de thèse, nous avons utilisé les approches PLM pour définir un cadre méthodologique applicable aux infrastructures linéaires et visant à réduire le nombre de référentiels de données dans la phase d'usage et à mieux piloter les opérations de mise à jour du jumeau numérique, préalablement aux modifications opérées sur l'infrastructure linéaire réelle. A travers ces réflexions, nous avons réussi plus généralement à proposer une stratégie alliant les avantages du BIM et du PLM permettant de répondre aux besoins des industries linéaires.

0.3.3. Plan du mémoire

Le premier chapitre « **Contexte Industriel** » sert à positionner le contexte industriel de la construction. Avant d'évoquer la structuration et les particularités des projets de construction, il sera question de rappeler comment l'avènement du PLM a permis aux industriels du manufacturier de mieux gérer leur flux d'informations et de capitaliser les données propres au produit. Parallèlement, il s'agira de montrer le cheminement depuis des problématiques construction jusqu'à l'avènement du BIM.

Le deuxième chapitre « **Etat de l'art** » servira à faire un état de l'art sur les méthodologies et outils de gestion de données utilisées pour des projets d'infrastructures. Ainsi, il s'agit de montrer comment à partir du bâtiment, le BIM a évolué vers la gestion des infrastructures. Aussi, comment le PLM est peu à peu introduit dans le domaine de la construction, non pas uniquement sur des problématiques liées au bâtiment mais également celles liées aux infrastructures linéaires. L'utilisation conjointe des deux notions nous permettra de déterminer les verrous scientifiques et techniques à lever dans la suite du document.

Dans le troisième chapitre « **Gestion du cycle de vie de l'Infrastructure Linéaire** », il est question de définir la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Ce cycle de vie repose évidemment sur les exigences liées à de telles structures. La détermination desdites exigences nous permettra de définir les besoins fonctionnels pour la gestion de leur cycle de vie. Ce chapitre fait ainsi ressortir l'inefficacité ou l'incomplétude des notions et fonctionnalités BIM et PLM vis-à-vis des infrastructures linéaires. En plus du PLM et du BIM, de nouvelles fonctionnalités liées à d'autres notions telles que GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), SIG (Système d'Information Géographique), IoT (Internet of Things) viendront couvrir les besoins fonctionnels de ces infrastructures.

Le quatrième chapitre « **Adaptation des concepts et proposition d'un modèle de jumeau numérique pour des infrastructures linéaires** » servira à poser les bases d'une utilisation conjointe des deux notions, en les additionnant aux fonctionnalités que proposent actuellement le jumeau numérique. Il s'agit donc d'adapter les concepts existants afin de proposer un modèle conceptuel de gestion de données pour les projets d'infrastructure linéaires. Cette adaptation sera formulée autour du Jumeau Numérique multi-vues de l'infrastructure linéaire.

Le cinquième chapitre « **Expérimentation sur Passage à Niveau** » servira à expérimenter les connaissances acquises au chapitre 4 afin de les appliquer à un passage à niveau. Avant d'appliquer notre proposition, nous allons au préalable définir le passage à niveau, en y relevant quelques considérations techniques. Notre proposition s'alignera avec les enjeux et problématiques métiers des passages à niveaux, notamment celle liée à la sécurité des usagers.

Ces réflexions et expérimentations aboutiront à une conclusion générale et à une discussion sur les perspectives de la suite des travaux.

Premier Chapitre :

Contexte Industriel

I. Contexte Industriel

L'utilisation des technologies numériques, liée à l'essor d'internet a débuté depuis plusieurs décennies de nombreux domaines notamment les médias, les télécoms et le tourisme. L'on s'est très vite rendu compte qu'en créant de la valeur, les opportunités liées à ce changement technologique s'avéraient supérieures aux risques. C'est dans ce contexte que les Entreprises de Services Numériques, dont Inetum, se sont constituées comme des partenaires pour accompagner différents types d'entreprise dans leur transition numérique.

Malgré des niveaux différents de maturité, la transformation numérique concerne tous les domaines économiques [McKinsey 2014]. La *Figure I-1* montre que, après le tourisme, les médias, la banque de détail et la grande distribution, il est noté une mutation numérique dans le secteur de biens de grande distribution, qu'on peut assimiler à l'industrie manufacturière. Celle-ci, portée par l'aéronautique et l'automobile, a, pendant environ 20 ans, connu plusieurs révolutions numériques au travers de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), puis de la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), enfin, par la gestion complète du cycle de vie des produits complètement dématérialisée. Dans ces secteurs, un haut niveau de maturité a été atteint autour des utilisations et du déploiement des outils numériques.

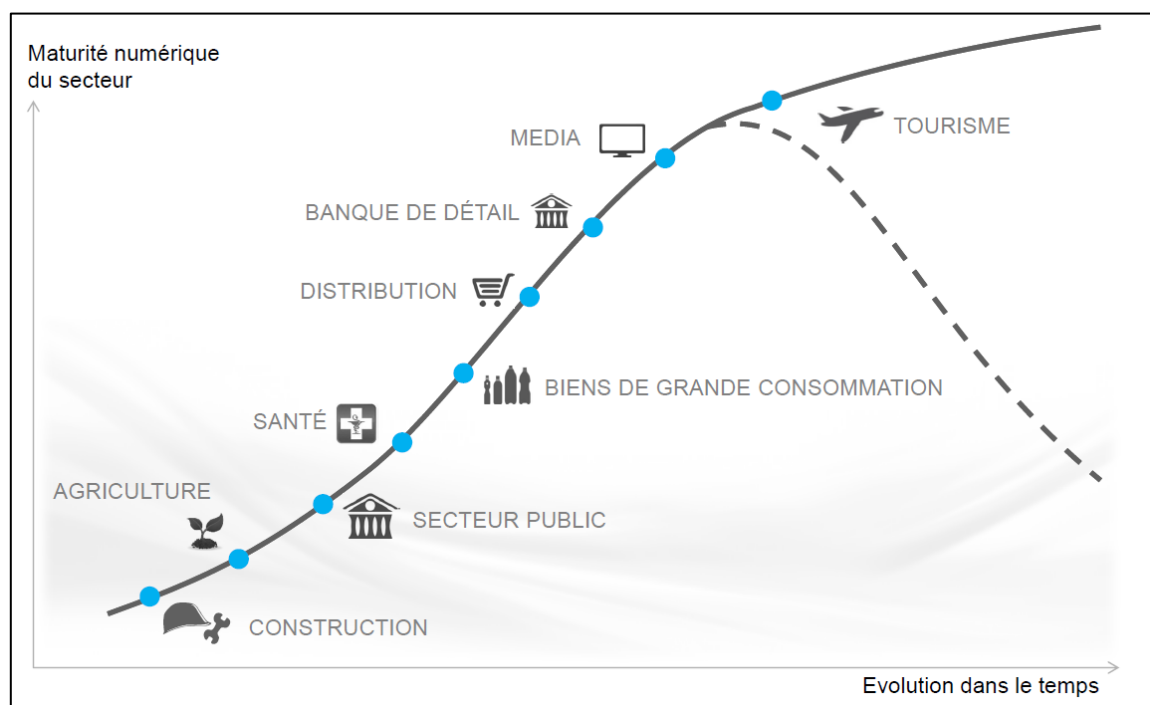


Figure I-1 : Maturité numérique de différents secteurs économiques (Source : [McKinsey 2014])

L'industrie du Bâtiment et Travaux publics (BTP) de son côté ne reste pas spectatrice de cette généralisation du numérique. Peu à peu, le numérique s'y installe et s'y développe, aussi

bien dans le secteur du bâtiment que dans celui des infrastructures. Cependant, le BTP n'est pas régi par les mêmes évolutions d'organisation et les mêmes règles contractuelles qu'une industrie manufacturière. Avec une plus grande multitude d'acteurs directs, il connaît des différenciations majeures en son sein, notamment entre la partie bâtiment et la partie travaux publics.

Ainsi, ce chapitre lié au contexte industriel a pour principal objectif de montrer comment dans une volonté d'accompagner la transition numérique des industries, il revient à Inetum de se focaliser sur les infrastructures linéaires. Il faut déjà noter que, de l'avènement du PLM pour le manufacturier à celui du BIM pour la construction, il existe plusieurs similitudes et différences, notamment d'un point de vue référentiel, produit ou projet. Ces différences s'accroissent lorsqu'il vient à évoquer des projets d'infrastructures linéaires, ayant une problématique de gestion de données dans le temps.

1.1. L'industrie manufacturière et le Product Lifecycle Management PLM

1.1.1. Les verrous de l'industrie manufacturière avant le PLM

Les industries manufacturières sont, selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques [INSEE 2016], des industries de transformation de biens, principalement pour leur propre compte, mais elles concernent également la réparation et l'installation de sites industriels ainsi que les opérations de sous-traitance. On pourrait ainsi lister les entreprises agroalimentaires, l'industrie textile, l'automobile, les industries aéronautiques, etc. Si les industries manufacturières ont su évoluer au cours des derniers siècles, elles ont toujours eu pour objectif de produire plus en dépensant moins. En effet, les aspects de développement de produits et de rentabilité sont aujourd'hui étroitement liés au sein de cette industrie. Pour accélérer leur croissance, elles doivent répondre à deux enjeux bien identifiés. Le premier enjeu est lié au marché qui peut être fortement concurrentiel. Il s'agit ici de répondre à la concurrence internationale, et de développer des marchés nouveaux, ce qui sous-entend des entreprises de plus en plus étendues. Un autre enjeu est lié au produit. Pour mettre à disposition les produits au plus tôt, il faut réduire les temps et coûts de développement, rationaliser les flux ainsi que rechercher des gains de productivité dans le domaine de la production, dans les domaines administratifs, ainsi que dans le domaine des développements. Pour renouveler les gammes de produits rapidement, il faut réorganiser les équipes, capitaliser les réussites et échecs passés, ainsi que réutiliser l'existant. Enfin, l'industrie manufacturière fait face à un contexte industriel en pleine mutation, où les produits évoluent avec des intégrations multi-expertes, où les organisations externalisent leurs activités, et où les sous-traitants deviennent des partenaires et assument une partie du risque industriel lors du développement d'un produit.

1.1.2. L'avènement du PLM

La réponse à ces enjeux industriels passe par une maîtrise et une gestion des processus de l'entreprise, localement et globalement. Il s'agit des processus d'ingénierie (vente, développement, fabrication, industrialisation, vente, et maintenance) dont la composante commune est le produit. Un produit se caractérise par sa description ainsi que l'ensemble des données relatives à sa définition, son développement, sa production, son utilisation, etc. Il se trouve que produit et processus peuvent avoir une évolution et des objectifs divergents. Il s'agit alors pour l'industriel d'être capable de définir, planifier et conduire de manière harmonieuse les processus d'ingénierie pour le développement d'un produit, c'est-à-dire utiliser les moyens de l'entreprise pour générer des flux d'informations et de matières.

Pour ce faire, les manufacturiers ont été accompagnés par les ESN à travers de nouvelles méthodologies de travail, à travers de nouveaux outils. Après être passée par la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et la CAE (Ingénierie Assistée par Ordinateur), l'industrie manufacturière en général, l'aéronautique et l'automobile en particulier, poursuit sa révolution numérique par la gestion complète de la dématérialisation du cycle de vie des produits : c'est la Gestion du Cycle de Vie Produit ou Product Lifecycle Management (PLM). Le PLM consiste à capitaliser toutes les informations concernant un produit tout au long des processus de l'entreprise en facilitant les échanges. Il permet aux différentes entités de l'entreprise de partager les informations associées au cycle de vie du produit. Le PLM peut être défini pour [Terzi et al. 2010] comme un modèle commercial, centré autour d'un produit, axé sur le cycle de vie, soutenu par les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), dans lequel les données sur les produits sont partagées entre les acteurs, les processus et les organisations, dans les différentes phases du cycle de vie, afin d'atteindre les performances souhaitées de durabilité du produit et de prestations de service. Le cycle de vie dépend du produit en question et a une influence sur les processus d'entreprise. [Kiritsis et al. 2003] définissent trois phases principales d'un cycle de vie : Beginning of life (BOL) qui inclut la conception et l'industrialisation ; Middle-of-life (MOL) qui inclut la distribution, l'utilisation et la maintenance du produit ; End-of-life (EOL) qui concerne le retrait du produit et son recyclage.

1.1.3. Le PLM pour une transformation numérique industrielle

Le PLM a profondément transformé l'industrie manufacturière. Le concept est globalement adopté et les bénéfices sont déjà notables au sein des différentes communautés et parties prenantes. Le PLM répond au besoin d'une gestion produit efficace dans laquelle la définition du produit correspond à l'ensemble des spécifications. En intervenant ainsi dans toutes les phases du cycle de vie, le PLM assure une continuité numérique entre les données de conception et les données de maintenance.

A la phase BOL, le PLM a un rôle de système fédérant les données de conception et de fabrication. A travers les outils de CAx (Computer-Aided technologies), les informations du

produit sont créées, gérées dans le but d'être distribué au bon moment aux différentes parties prenantes. A la phase MOL, le PLM centralise toutes les informations du produit, sa nomenclature, ses informations de maintenance, ses configurations, son historique de modification et d'intervention de maintenance. Les données sont collectées afin de contrôler le statut du produit. Il s'appuie principalement sur les données issues de la phase BOL dans le but d'analyser, et de comprendre le comportement du produit. Enfin à la phase EOL, le PLM fournit les informations concernant le démantèlement du produit ou alors les potentielles réutilisations de ses composants.

En outre, le PLM contribue à l'amélioration de la collaboration. Plusieurs cas ont été étudiés, notamment celle de la chaîne de sous-traitance aéronautique [Van Wijk 2011], ou encore la collaboration des PME avec leurs donneurs d'ordre [Mahdikhah 2016]. Un autre impact du PLM est celle de la gestion et la capitalisation de la connaissance [Bissay et al. 2008]. Cet auteur propose une démarche d'intégration des connaissances au système PLM. [Pernelle et Lefebvre 2006] proposent une modélisation intégrée pour la pérennisation des connaissances. De ces études, on pourrait conclure qu'un logiciel PLM permet d'optimiser chacune des tâches effectuées dans l'entreprise, de résoudre les anomalies et de réduire les retards. Certains bénéfices ne sont pas directement quantifiables : amélioration de la productivité grâce au renforcement de l'intégration des informations ; suivi rigoureux des procédures ; réduction des délais de mise sur le marché lié au temps réduit lors des étapes de développement des produits ; favorisation de l'innovation à travers une meilleure gestion de la diversité et de la configuration produit. Ayant ainsi atteint un niveau de maturité autour des usages et du déploiement des outils numériques dans ces industries, les entreprises de service PLM visent à étendre leur savoir-faire à de nouveaux secteurs afin de les accompagner dans leur transformation numérique. C'est le cas de l'industrie de la construction.

1.2. L'industrie de la construction.

La construction consiste à assembler différentes matières avec des techniques adaptées à la création d'un ouvrage. Encore appelée Bâtiments et Travaux Publics (BTP), ce secteur englobe toutes les activités de conception, de construction, et de maintenance :

- Des bâtiments : publics et privés, industriels ou non, ils sont destinés à manifester leur permanence comme fonction sociale (Hôpitaux, ...), économique (Hôtels, ...), politique/administratif (Mairies, ...) ou culturelle (centres culturels, ...)
- Des « travaux publics » : Ces chantiers sont le plus souvent menés par des pouvoirs publics ou par de grandes entreprises à qui l'État a confié ou concédé une mission de service public. On peut citer comme exemple routes, autoroutes, voies ferrées, ponts, gazoducs, oléoducs, aménagements urbains (aménagement d'une place, enterrement de lignes électriques et téléphoniques, lignes de tramway), aménagements portuaires.

1.2.1. Les acteurs

On distingue trois principales fonctions en construction.

1.2.1.1. *La Maîtrise d'Ouvrage (MOA)*

C'est celui pour qui on construit : le client ou le représentant du propriétaire. Ce dernier définit le programme, l'enveloppe financière et le planning de l'opération. Ses activités s'effectuent essentiellement en amont de la conception et de la réalisation de l'ouvrage : ce sont les études préalables. Par la suite, il contrôlera et validera chacune des phases de conception. La MOA peut être accompagnée :

- D'un gestionnaire d'infrastructure, des usagers ou de l'exploitant : ce sont ceux qui vont utiliser l'ouvrage ou le maintenir ;
- D'une MOA déléguée et d'une Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) : elles réalisent des tâches en appui pour le compte du client MOA qui peut ne pas avoir d'expertise en construction.

1.2.1.2. *La Maîtrise d'Œuvre (MOE)*

La MOE conçoit, dessine et décrit le bâtiment. On la retrouve dans les différentes étapes de conception validées par la MOA, et suit également toutes les étapes de réalisation du bâtiment jusqu'à la livraison. On y retrouve :

- Les architectes en amont sur la conception d'ensemble de l'ouvrage et pour le dépôt de permis de construire ;
- Les ingénieurs, que l'on peut classer en trois grandes catégories : ingénierie technique, ingénierie financière et ingénierie de management. Ils se situent plutôt en aval sur les études de conception et la direction de travaux ;
- Les géomètres et les économistes de la construction.

Dans l'élaboration du projet, la MOE tient compte du programme, de la réglementation, des références culturelles, du site, des matériaux et de leur mise en œuvre, du budget ...

1.2.1.3. *Les entreprises de construction proprement dites*

- Les entreprises de Gros Œuvre : fondations et ossatures.
- Les entreprises d'installations techniques : chauffage, sanitaires, électricité.
- Les entreprises de Second Œuvre et finitions pour habiller, décorer et finir l'ouvrage.

1.2.2. Les particularités d'un projet de construction

Contrairement à l'industrie manufacturière où les acteurs ont pour référentiel le produit, les acteurs des bâtiments et ouvrages ont pour référentiel le projet. Concernant les produits

manufacturiers, une seule définition permet la réalisation et la fabrication de plusieurs produits. Les projets de construction et leurs résultantes quant à eux sont quasiment uniques. Une définition n'implique qu'une seule réalisation. Seuls les bâtiments peuvent réellement être construits à l'identique, encore faut-il que l'environnement soit quasiment identique. L'origine de cette singularité peut s'expliquer de plusieurs façons. Le facteur le plus caractéristique de cette singularité est l'environnement d'utilisation des produits délivrés. En effet, si pour construire des avions, voitures ou bateaux, l'étude du sol ou de l'air est moins consistante, ce n'est pas le cas pour une construction. L'étude de l'environnement de la construction reste primordiale. Les conditions géotechniques et topographiques influencent énormément les projets de construction. Il devient indispensable de resituer l'ouvrage à venir dans son contexte, en ville, en campagne, orientation nord, sud, ouest, est. Les parties prenantes différentes et les besoins étant particuliers d'un client à un autre, les constructions n'ont pas d'autre choix que d'être uniques.

Cette singularité de produit confère une difficulté aux entreprises. Les entreprises sont dans l'obligation de reprendre l'étude de terrain de la construction ainsi que son environnement. La réutilisation de l'existant ici est assez limitée. Elle se limite au savoir et compétences acquises lors de l'étude des projets qui se rapprocheraient de celle du projet à construire. Ainsi les entreprises se trouvent à mener en parallèle plusieurs projets, dans plusieurs contextes, et différentes localisations. Un autre facteur important est la diversité et la variété des entreprises de construction, bien qu'on retrouve bien-sûr quelques leaders du domaine (BTP : BOUYGUES, SPIE BATIGNOLLES, TP : VINCI (EUROVIA), EIFFAGE). L'harmonisation des moyens et de la connaissance devient donc une limite à surmonter, encore plus difficile si les outils utilisés déjà au sein d'une même entreprise sont différentes. Dans la même logique, il devient difficile de gérer les données en phase post-construction, ce qui peut s'avérer dangereux en cas d'incidents majeurs (ex : fracture du pont de Gènes). Un autre élément à considérer, en plus de cette singularité, est le temps long entre la première étude et la réalisation, décrite en introduction. Cela implique de multiples phases, longues, avec des niveaux de précisions différents mais qui se nourrissent chacune de la phase précédente.

1.2.3. Enjeux et contraintes

Comme toute industrie, la construction fait face à des enjeux d'innovation et de compétitivité. Il s'agit de réduire les coûts de construction, de réduire les délais et modifications tardives, d'améliorer l'efficacité et la qualité de la construction et d'intégrer l'utilisation des nouvelles technologies (RA, RV, laser scanning, IoT). Viennent également des enjeux de développement durable. Il s'agit de réduire l'impact écologique d'une construction et de mieux gérer les ressources naturelles qui s'amenuisent. Enfin il est question de mieux gérer le patrimoine immobilier et infrastructurel.

La construction est soumise à une réglementation. L'ingénierie de construction s'inscrit dans un mode projet très structuré en France autour des phases décrites par la loi no 85-704

du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, dite loi MOP. Cette loi constitue une des bases du droit de la construction publique en France, avec le Code de la commande publique. Son rôle est de déterminer les attributions de ces deux acteurs principaux de l'acte de construire dans le cadre d'une commande publique que sont la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre. En distinguant les attributions des acteurs, la loi MOP recommande un changement d'acteurs d'une phase à une autre. En répartissant les phases MOP sur le cycle de vie d'une construction, on obtient (*Figure I-2*) :



Figure I-2 : Les étapes projet telles que définies par la loi MOP

- Etudes préalables

L'architecte sélectionné fait une étude de faisabilité de projet. Il propose à la MOA d'abord des solutions d'ensemble de l'ouvrage (Etudes d'Esquisse (ESQ)), puis une définition de la dimension de l'ouvrage et des principes de construction et matériaux (Etudes d'Avant-Projet (AVP), AVP Sommaire et AVP définitif). Cette phase se termine sur une Demande de Permis de Construire (DPC).

- Conception détaillée de l'ouvrage : Etudes de projet – PRO.

C'est la phase de définition et de description technique de l'ouvrage. Des descriptifs quantitatifs estimatifs (DQE) serviront à constituer le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) afin que les entreprises intervenantes proposent des devis solides.

- Construction de l'ouvrage

Après des études et plans d'exécution (EXE), l'architecte prépare la contractualisation avec des entreprises de travaux. S'en suivent préparation de chantier, construction et livraison et réception de l'ouvrage (Assistance aux Opérations de Réception (AOR)). Dans cette dernière étape, est rédigé le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE). C'est le document contractuel qui retrace le parcours du projet depuis les études géotechniques, et propose des indications pour l'exploitation et la maintenance.

- Exploitation et Maintenance.

Si l'exploitation désigne la manière dont est utilisé l'ouvrage, la maintenance elle propose des tâches régulières à réaliser pour garder l'ouvrage dans un état optimal d'utilisation. Cette phase peut se terminer avec la destruction ou la déconstruction de l'ouvrage.

Le découpage en phase de la loi MOP a un impact significatif sur l'organisation des projets de construction. Elle fait ressortir le fort besoin de collaboration, et d'interopérabilité entre les différents outils utilisés par les différents acteurs.

1.2.4. La répartition des coûts par phase

Une particularité de la construction est que les coûts augmentent au fur et à mesure du projet. La phase d'exploitation et maintenance est la plus onéreuse, et la phase de conception la moins onéreuse. Les économistes de la construction estiment à 2% du coût total, les coûts de conception d'un ouvrage. Toutefois, sa position en amont fait d'elle celle où il le plus possible d'optimiser les coûts à venir. L'enjeu est d'avoir une meilleure conception possible afin de pouvoir utiliser continuellement ces données de conception pour optimiser les phases de construction/exploitation/entretien. Cette répartition n'est pas compatible avec la vision budgétaire. En effet, les études sont les premières dépenses, et il est toujours délicat de payer plus immédiatement pour un hypothétique gain à venir. Les gains peuvent être importants. L'Observatoire des métiers du numérique, de l'ingénierie, du conseil et de l'évènement [OPIIEC 2016] estime que si on augmente les coûts de conception de 20% et que l'on espère économiser 30% sur la phase de construction, le gain global apparaît finalement de 8%.

1.3. Réponse au besoin de transition numérique : l'avènement du BIM

1.3.1. Historique

L'industrie de la construction est un secteur porteur de pour l'économie française. Le rapport [McKinsey 2015] relève également l'importance relative du domaine comparé aux autres secteurs d'activité à une échelle internationale. Toutefois, ces derniers révèlent un secteur dont la productivité est moindre comparée au secteur manufacturier. Depuis 25 ans, l'étude affirme que le secteur connaît une augmentation moyenne de productivité de 1 % par an contre 3,6 % pour le secteur manufacturier dans son ensemble. Dans ces secteurs, un niveau de maturité a été atteint autour des utilisations et du déploiement des outils numériques. Le secteur de la construction a connu un relatif retard en matière de productivité et d'automatisation. C'est ce qui explique (*Figure 1-3*) le faible taux de productivité par rapport à d'autres industries similaires (automobile, aéronautique, etc.) [Pekuri et al. 2012; Teicholz 2013].

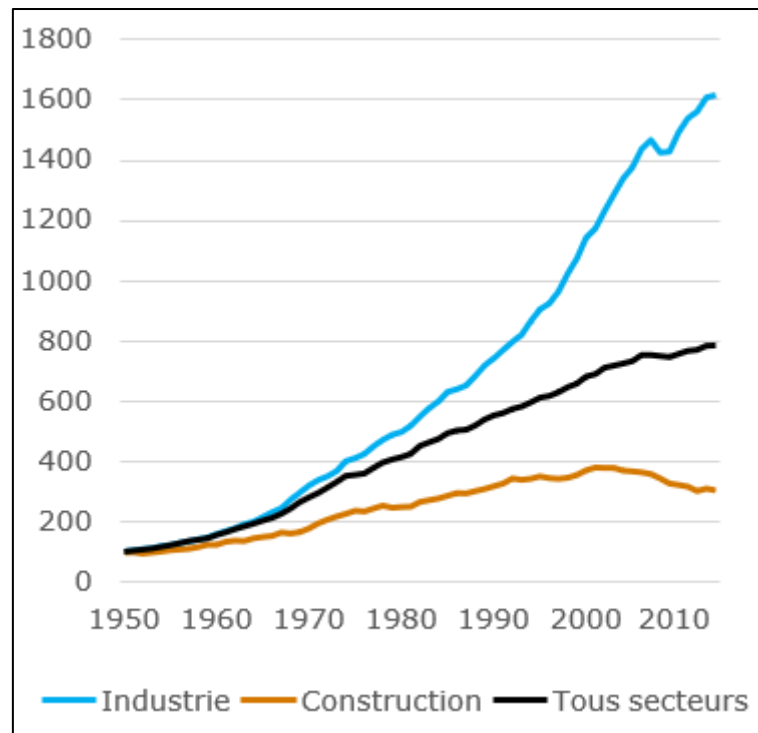


Figure I-3 : Productivité horaire apparente (Source : [OPIIEC 2016])

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette productivité horaire apparente moindre. [Teicholz 2004] avait énuméré trois facteurs.

Le premier est la nature fragmentée du domaine de la construction en raison de l'approche traditionnelle de la livraison de projet de construction. Cette approche traditionnelle est celle du Design-Bid-Build. [Konchar et Sanvido 1998] définissent cette dernière comme un système de livraison de projet où la MOA passe un contrat séparé avec un concepteur et un constructeur. Un constructeur est généralement sélectionné et conclut une entente avec la MOA pour construire une installation conformément aux plans et devis. Cette approche Design-Bid-Build fragmente les rôles des participants pendant les phases de conception et de construction. Une solution serait de passer à une approche Design-Build.

Le deuxième facteur est l'utilisation excessive des plans 2D papier. [Chalhoub et Ayer 2018] rappellent que l'interprétation des plans de conception par les constructeurs peut être différente de l'intention initiale des concepteurs. Traditionnellement, les plans papier 2D ont été le principal moyen de communication dans la construction [Barnes 1988]. Cependant, il peut y exister plusieurs failles de communication à travers la 2D sur papier menant à des conceptions erronées ou inexécutables, des informations manquantes, ou une représentation de conception ambiguë [Eckert et Boujut 2003].

Le dernier facteur est lié à l'écosystème industriel de la construction. Son émiettement ne favorise pas l'apparition des leaders, comme ce peut être le cas en aéronautique avec Boeing et Airbus. Il résulte des recherches et développements moins forts sur les méthodes de travail,

ainsi qu'une capitalisation de connaissances assez limitée. En réponse, on a observé une mutation du secteur. Outre la mise en place de nouveaux cadres contractuels (conception-construction, PPP, MOP, ...), le secteur connaît un changement technologique lié à la percée des nouveaux moyens numériques. Avec ces spécificités, les dernières années ont vu le développement du BIM [Lemaire et al. 2019], qui amorce la transformation numérique du secteur de la construction.

1.3.2. Définitions

Les acteurs de la construction, favorables à la transformation numérique de leur secteur, tendent vers un langage commun : le BIM. Son avènement bouleverse les méthodes de travail, modifie les responsabilités non seulement en changeant les rôles des acteurs traditionnels [Sebastian 2011] mais en créant aussi de nouveaux rôles comme celui de BIM Manager [Davies et al. 2017]. Malgré ces changements, il est difficile de trouver une définition du BIM, acceptée par tous. Chaque acteur l'utilise et le définit en fonction de ses besoins. Le Conseil Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) le définit comme un système de gestion de projet BTP autour d'une maquette numérique paramétrique 3D qui contient des données intelligentes et structurées. Originellement orienté Bâtiment, le B du BIM devient générique et a également pour vocation d'inclure les infrastructures. Comme le rappellent [Pauline et al. 2016], le BIM n'est pas que la maquette numérique 3D, c'est aussi optimiser le processus de travail et de collaboration des intervenants d'un projet, autour d'une maquette numérique, qui contient l'ensemble des informations permettant la conception, la construction ainsi que la gestion d'une construction.

Nous définissons le BIM suivant trois axes : la maquette numérique, les outils de création et de modification de la maquette numérique, et enfin la collaboration et la gestion de projet autour de la maquette numérique.

1.3.3. Building Information Model ou la maquette numérique

Le « Model » est un fichier créé avec un logiciel métier spécifique, alliant objets, géolocalisation, géométrie, informations, sémantique : c'est la maquette numérique. La maquette numérique est une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un produit, bâtiment ou infrastructure.

Le BIM est défini par [Lebègue et Celnik 2015] comme une maquette numérique « sémantisée » de bâtiment, ou alors Maquette Numérique du Bâtiment (MNB). Il s'agit de la base de données géométriques 3D, permettant de représenter les projets de construction de toute échelle : la ville, le quartier, l'infrastructure, le bâtiment et ses composants et systèmes constitutifs. Elle permet également, à partir des différents modèles métiers (modèles architecte

enveloppe, structure dalles et poteaux, structures voiles intérieurs, réseau Chauffage – Ventilation - Climatisation (CVC), modèles d’analyse thermique) d’analyser, de contrôler et simuler certains comportements de l’ouvrage. Elle comporte la structure/arborescence produit.

A chaque étape de projet, on définit le niveau de richesse de la maquette numérique à travers son « Level Of Development » LOD. Le LOD représente la maturité du Model. Le concept de LOD est utilisé pour gérer l'évolution du modèle à travers les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment [Abualdenien and Borrmann 2018]. Pour [Hooper 2015], le concept organise la nature itérative du processus de conception qui améliore la prise de décision. Un LOD décrit les éléments BIM sur une étape particulière en fournissant des définitions et des illustrations qui représentent leur qualité d'information, c'est-à-dire la certitude et l'exhaustivité. D'un niveau inférieur à un niveau supérieur, l'échelle LOD permet d'affiner la précision d'information. Par conséquent, la qualité des caractéristiques associées des éléments du modèle échangés est augmentée. L'American Institute of Architects (AIA) a introduit une définition du terme LOD qui comprend cinq niveaux, à partir de LOD 100 jusqu'à LOD 500. De plus, il ajoute plus de flexibilité en définissant des étapes intermédiaires, comme LOD 350 qui nécessite la représentation de l'interface entre les différents systèmes de construction. Le *Tableau I-1* donne une description brève du contenu des LOD et la *Figure I-4* l'évolution des LOD de la maquette numérique dans le temps.

LOD	Définitions
LOD 100	Représentation des encombrements géométriques
LOD 200	Définition & association des propriétés non géométriques à la 3D
LOD 300	Des objets génériques à des objets spécifiques
LOD 350	Interactions entre éléments
LOD 400	Haut niveau de détail nécessaire à la construction du chantier
LOD 500	Représentation du tel-que-construit => DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés.

Tableau I-1 : Définitions des LOD

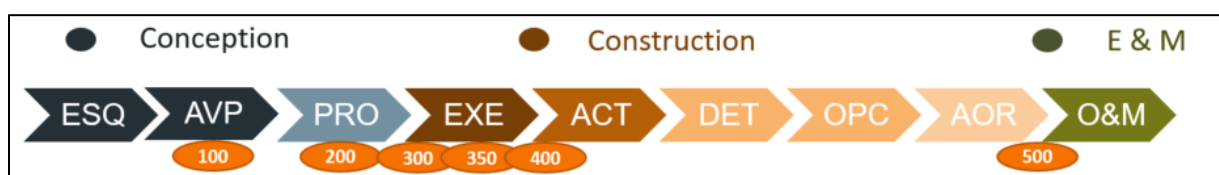


Figure I-4 : Evolution de la maquette numérique en fonction des phases projet

Le Model est donc le volet du BIM qui va favoriser la transition entre 2D et 3D, trois dimensions étant nécessaires pour décrire parfaitement un objet physique. Toutefois, si l'utilisation de la 3D prend de plus en plus de place, il n'est pas possible de se passer complètement des plans 2D. La 3D n'a donc pas pour vocation de remplacer la 2D. Il serait ainsi opportun d'utiliser conjointement 2D et 3D. Le Model ne se limite pas en outre à trois dimensions. [Mediaconstruct 2019a] définit 7 dimensions du BIM, représentées dans le *Tableau I-2*.

Dimensions	Définitions
2D	Utilisation des plans 2D sur le chantier
3D	Un modèle 3D, qui comprend des informations et peut être simulé dans un environnement virtuel rassemblant des conditions réelles
4D	Un BIM 3D composé d'objets et assemblages à qui sont liés calendrier et contraintes de temps.
5D	Un BIM 4-D composé d'objets et assemblages ayant une dimension coût. L'information coût peut être contenue dans le BIM ou alors liée ou associée au matériel de construction
6D	Traite les informations concernant la durabilité d'un bâtiment, comme l'analyse énergétique
7D	Le modèle 7D intégré contient toutes les informations nécessaires au propriétaire pour l'usage et l'entretien du bâtiment ainsi que les données patrimoniales
XD/nD	Le X concerne toute donnée concevable supplémentaire comme la problématique de gestion des hommes ou encore une dimension utilisateur [Mohanta and Das 2016; Schaumann 2013]

Tableau I-2 : Les dimensions du BIM

1.3.4. Building Information Modeling

Le Building Information Modeling concerne tous les outils et logiciels qui permettent de créer et/ou modifier le BIM Model. Les outils concernés pour la plupart des logiciels de conception 3D, ou des logiciels de simulation. Ces modèles seront intégrés progressivement à la maquette numérique centrale. Ces applications BIM peuvent être réparties en 3 catégories, selon leur rôle :

- Les logiciels BIM qui regroupent les logiciels de conception 3D où sera créée la maquette numérique, ainsi que les logiciels/applications spécifiques différentes analyses métiers : calculs statistiques, visualisation, simulations thermiques, simulations vibratoires, etc. Certaines suites comme REVIT ou ARCHICAD proposent ces types de logiciels.
- Les plateformes BIM qui contiennent et affichent (à l'aide de viewers) le modèle virtuel 3D. Certaines proposent également la production de plans, la visualisation et la détection des interférences. Supportant la conception et la modification des objets du modèles, les logiciels BIM y sont reliés avec des possibilités de check-in, check-out. Elles sont souvent accessibles via le web en mode cloud. Les principales plateformes sont Revit, Trimble, ArchiCAD, Bentley, Vectorworks, Digital Project, Tekla, Nemetschek.
- Les environnements BIM, Serveurs BIM qui fournissent la capacité à gérer des informations beaucoup plus variées que le ou les modèles 3D. Ils peuvent en outre héberger plusieurs plateformes et plusieurs outils BIM. Les grands développements à venir dans le BIM se feront certainement sur les serveurs BIM, qui devront être capables de gérer des bibliothèques d'objets et de les utiliser avec différentes applications.

1.3.5. Les niveaux de maturité du BIM

On distingue quatre niveaux de maturité BIM, du niveau 0 au niveau 3. Ces niveaux comprennent des composantes technologiques, stratégiques et liées aux processus d'enrichissement et de partage du « Model ».

Le BIM Niveau 0 ou le pré-BIM correspond à une absence de collaboration mais surtout à l'utilisation unique de la CAO 2D non gérée ou structurée, ainsi qu'un échange et partage au format papier et/ou électroniques imprimés. Beaucoup d'entreprises se trouvent encore à ce niveau. C'est le niveau de départ, avant la prolifération du BIM.

Le BIM Niveau 1 ou le Model isolé correspond à un mélange de 2D et de maquette numérique 3D. Une modélisation à base d'objets : les utilisateurs génèrent des modèles par activité (ou lot de travail) propres aux différentes phases du cycle de vie du projet (conception/design, construction, exploitation de la construction).

Le BIM Niveau 2 ou le Model fédéré correspond au niveau à partir duquel se met en place un processus de travail collaboratif à base de modèles architecturaux et structurels. Chaque acteur fait évoluer son modèle. Les modèles sont combinés en un seul modèle unique ou fédéré. C'est avec ce modèle unique que seront effectuées les détections de conflits par exemple.

Le BIM Niveau 3 ou le Model intégré offre tous les avantages du BIM. Cela correspond à une intégration basée réseau. Il consiste en des modèles intégrés riches, partagés et maintenus au travers d'un modèle unique stocké sur un serveur centralisé, accessible par tous les intervenants et durant toute la durée de vie d'un ouvrage via des formats d'échanges. Il s'agit d'une collaboration totale qui soulève des problématiques d'interopérabilité, de propriété intellectuelle, de responsabilité, et de réglementation.

La Figure I-5 illustre le contenu technique lié aux différents niveaux de maturité du BIM.

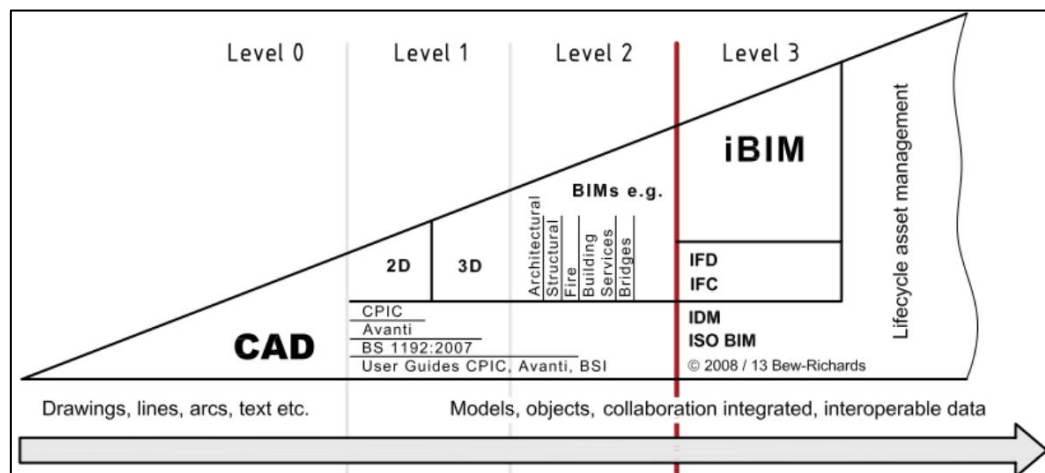


Figure I-5 : Contenu technique des différents niveaux de maturité du BIM. (Source : [BIM Blog Luxembourg 2015])

1.3.6. Les avantages du BIM

Le Building Information Modelling a été pensé initialement bâtiment. Des outils de conception peuvent désormais communiquer et échanger les données entre elles. En mettant en évidence les incompatibilités entre les contributions, et en utilisant un modèle et un langage commun, le BIM va servir de référentiel unique de conception et de réalisation. Ce référentiel est un modèle de données riches et modulaire qui inclut les normes réglementaires, et peut intégrer des données temps et budget pour faire de la planification et du suivi. Son rendu 3D quasiment conforme à la réalité permet la visualisation des solutions pour des échanges facilités (recueil des besoins et retours des utilisateurs finaux - MOA, exploitants, usagers...) tout en gardant la possibilité d'exporter à tout instant les plans 2D. Si on rajoute des capacités de simulation, nous obtenons un outil principalement basé non pas sur la gestion des données mais sur la conception numérique du projet.

De ces forces, on peut en tirer plusieurs avantages.

- Expression du besoin et relation avec le maître d'ouvrage

- La visualisation 3D facilite les échanges avec le maître d’ouvrage en expression de besoin. Elle accélère aussi le cycle de validation client et limite les conflits / changements pendant la construction.
 - Le modèle 3D complet remis au client est un livrable clé pour sa future gestion opérationnelle des installations (entretien, maintenance...). Il pourra devenir le « carnet de santé » de l’ouvrage. Il s’agit ici pour le BIM d’apporter un DOE numérique.
- Coordination des contributions des différents acteurs
 - Le BIM simplifie les études de faisabilité grâce à des calculs en temps réel de coûts, de temps, d’impacts (performance énergétique, optimisation des travaux, conformités réglementaires, etc.) ...
 - Les échanges sur un support unique partagé (maquette numérique) par les différents corps de métiers accélèrent et fiabilisent la conception.
 - Le suivi de réalisation simplifié améliore la qualité globale du projet.
 - La planification des travaux et le contrôle des délais sont optimisés.
 - Optimisation économique (une fois le BIM mature)
 - Les coûts projets sont globalement diminués par la possible réutilisation de modèles, par un meilleur contrôle des risques et aléas de chantier entraînant aussi une réduction du coût de l’assurance construction.
 - Pour le MOA, les coûts de construction sont optimisés car l’analyse des besoins en matériaux est permise par le BIM. Certaines entreprises rapprochent les équipes de conception et les économistes de la construction.

1.4. La place des infrastructures linéaires au sein de la construction

1.4.1. La part des infrastructures linéaires

La Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) établit que les Travaux Publics sont scindés et moins bien classés que le secteur du bâtiment [FNTP 2019]. Ces Travaux Publics ont un chiffre d’affaires de 41 milliards d’euros en 2018, avec un quasi-équilibre entre le CA des travaux neufs et des travaux d’amélioration. Le *Tableau I-3* nous montre une comparaison et une répartition des coûts entre les projets de bâtiments et de travaux publics.

	Bâtiment Source : [FFB 2018]	Travaux Publics Source : [FNTP 2019]
Coûts Travaux (en millions d'€)	140 000	41 004
Travaux neufs	63 000 (45%)	23 477 (57,3%)
Entretien-amélioration	77 000 (55%)	17 527 (42,7%)
Nombre de salariés	1 104 000	241 514
Ouvriers	781 000 (70,8%)	145 098 (60,1%)
ETAM	230 000 (20,8%)	60 962 (25,9%)
IAC	93 000 (8,4%)	35 454 (14,0%)
Nombre d'entreprises	394 000	7 488

Tableau I-3 : Comparaison Bâtiment vs Travaux Publics en France en 2018

Les acteurs sont sans cesse renouvelés, et les partenariats diversifiés. Aussi, concernant les infrastructures linéaires, les clients (pouvoirs adjudicateurs) sont de taille et d'organisation très variées (Etat, conseils généraux) (Tableau I-4).

L'aspect construction des infrastructures linéaires leur confère le même cycle de vie que celui du bâtiment. Les phases principales sont la conception (dans laquelle sont inclus les études) (BE du concepteur) ; la construction (constructeur) ; l'exploitation (l'exploitant). Dans son rapport d'activité 2008, la FNTP donne quelques chiffres sur la patrimoine infrastructurel français : plus d'un million de kilomètres de routes, un million de kilomètres de réseaux d'eau potable (estimant la valeur du patrimoine de l'eau à 400 milliards d'euros), 200 000 ponts et 900 tunnels, 30 000 kilomètres de voies ferroviaires (L'entretien et la mise à niveau de l'ensemble des 49 000 km de voies sont également cruciaux pour la sécurité, le développement économique des territoires et la mobilité du quotidien), 8 500 km de voies navigables, 35 000 km de gazoducs et 200 000 km de canalisations de distribution de gaz font partie des réseaux stratégiques du territoire.

	2016	2017	2018	part
Etat	1 154,80	1 217,40	1 133,10	2,70%
Conseils régionaux	771,4	752,8	774,5	1,90%
Conseils départementaux	2 609,40	2 923,00	3 510,10	8,60%
Communes et EPCI	11 084,70	12 064,10	13 744,20	33,50%
Collectivités locales	14 465,50	15 739,90	18 028,80	44,00%
EDF, RTE, Enedis, Engie, GRT, GRDF	2 960,90	2 969,70	2 815,10	6,90%
SNCF Réseau, RATP, SEM transports collectifs urbains	1 888,00	2 250,30	2 348,70	5,70%
Autres (Société du Grand Paris, aéroports, ports autonomes, ...)	1 031,10	1 530,60	2 040,20	5,00%
Entreprises Publiques	5 880,00	6 750,60	7 204,00	17,60%
Particuliers	1 811,00	1 763,20	1 721,70	4,20%
Entreprises industrielles et commerciales	8 673,20	9 267,20	9 282,60	22,60%
Sous-traitance d'entreprises BTP	2 185,10	2 434,60	2 438,40	6,00%
Secteur privé	12 669,30	13 465,00	13 442,70	32,80%
Sociétés autoroutières	694,5	845	691,3	1,70%
Concessions ferroviaires	411,7	165,1	147,8	0,30%
Autres (énergie, éclairage, aéroports)	434,5	367,7	356,3	0,90%
Concessions et contrats de partenariats	1 540,70	1 377,80	1 195,40	2,90%
ENSEMBLE	35 710,30	38 550,70	41 004,00	100,00%

Tableau I-4 : Structure détaillée de la clientèle (en millions d'euros)

1.4.2. Les spécificités d'une infrastructure linéaire

Comparée aux autres fabrications industrielles ou aux bâtiments, plusieurs éléments sont spécifiques à une infrastructure linéaire.

1.4.2.1. Gestion de projet et répartitions des acteurs.

Un ouvrage de type infrastructure linéaire est unique. L'effort est mis dans sa conception, sur la base d'une commande préalable établie via des pré-études. Toutefois, si l'objet est unique, l'ensemble des dispositifs de mise en œuvre est cohérent et peut être optimisé et répliqué sur d'autres projets. Ce qui est mis en œuvre pour sa réalisation peut être issu d'une

réutilisation de résultats d'autres projets. L'effort des parties prenantes réside dans la maîtrise du processus global et la réutilisation d'une partie de l'effort consenti sur d'autres projets.

Les projets d'infrastructure linéaire sont également uniques. Plusieurs projets sont souvent menés en parallèle par des grandes entreprises de travaux publics. Les partenaires impliqués dans chaque projet sont différents d'un projet à l'autre. Cette multitude de projets en simultané résulte dans le fait que les acteurs n'utilisent pas les mêmes références du produit. Le référentiel ici est le projet. Une fois le projet terminé, c'est-à-dire l'infrastructure construite, le référentiel projet se confronte à une limite de gestion de données du produit, pour les phases aval d'exploitation et maintenance. Il est ainsi nécessaire d'agréger les parties prenantes autour d'un référentiel de données et d'information lié au produit. Vu que les infrastructures en question servent de moyens de transport public, un élément crucial à considérer pour les projets d'infrastructure linéaire est l'intervention de la puissance publique. Etats ou collectivités territoriales locales interviennent généralement en tant que maîtres d'ouvrage.

1.4.2.2. *Linéarité et longueur des structures.*

Ce qui est marquant aux premiers abords d'une infrastructure linéaire est sa longueur et sa linéarité. La direction d'une infrastructure linéaire est donnée par son axe projet. On ne retrouve cette notion sur aucun autre produit industriel. En plus de la géolocalisation, les composantes d'une Infrastructure linéaire se repèrent par rapport à cet axe, avec la notion de point kilométrique de la structure. En plus de la linéarité, les projets peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres. Le repère de référence topographique doit ainsi être adapté à de telles longueurs

Cette linéarité et cette longueur ont des implications sur le cycle de vie des composantes de l'infrastructure concernée. En dehors du fait que les produits soient quasi-unique (ou à répétitivité limitée), les objets sont multi-échelles. Les automobiles, les navires et les avions sont des objets tout au plus décamétriques. Les ouvrages d'arts sont fréquemment d'ordre hectométrique. Les infrastructures linéaires peuvent aborder l'échelle de la centaine de kilomètres. Pourtant, les détails constructifs de certains objets sont centimétriques ou millimétriques comme pour les objets de l'automobile ou de l'aéronautique. La gestion des échelles est donc une contrainte de conception.

Les infrastructures linéaires favorisent la cohésion territoriale. Leur longueur leur fait s'étendre et de traverser plusieurs frontières communales, départementales et régionales. Comme le montre précédemment le *Tableau I-2*, les collectivités locales font partie de la clientèle. Pour un projet, il se trouve plusieurs collectivités parties prenantes. Il est donc nécessaire de redéfinir les responsabilités pour chaque tronçon d'infrastructure. Si on prend le cas d'un passage à niveau par exemple, la partie ferrée et sa signalisation est sous la responsabilité de l'organisme régional de la SNCF, tandis que la signalisation routière reste sous la responsabilité

de la commune. Cela sous-entend logiquement un besoin de communication continue entre les acteurs des deux ouvrages, ainsi qu'avec les autorités locales.

1.4.2.3. *Impacts significatifs de l'environnement sur l'infrastructure*

Contrairement aux bâtiments, il n'est pas possible de positionner une infrastructure linéaire dans un référentiel orthonormé. La longueur du projet, les produits multi-échelles, la quasi-unicité des produits obligent à définir des moyens de positionner l'infrastructure dans son environnement. Un moyen de le faire est de découper le projet en objets ou en composants et proposer une juxtaposition de référentiels (de type géodésique, ou alors de type local pour telle ou telle partie de l'ouvrage), et de Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les conditions géotechniques et la topographie interagissent très fortement sur l'ouvrage. L'existant a un poids prépondérant dans la conception d'une infrastructure linéaire. Les systèmes d'information géographiques ont donc ici un rôle important dans la maquette numérique. Le sous-sol et les conditions géotechniques qui lui sont attachées sont difficiles à connaître. En effet, elles varient tout le long de l'infrastructure. Elles ne sont d'ailleurs jamais connues parfaitement, même après réalisation du projet.

De même, la topographie a une importance bien plus grande que pour un bâtiment sur un site donné. Les variations du relief constituent l'une des premières problématiques dans la conception d'une infrastructure linéaire. L'environnement a un poids important et un caractère évolutif sur l'échelle de temps que représente la durée de vie d'une infrastructure linéaire. L'organisation du chantier doit tenir compte de contraintes plus fortes concernant le foncier : libération progressive des emprises, déplacement du chantier (équipes et matériels) sur de grandes distances. La maquette ne doit pas seulement représenter un ouvrage fini, mais doit aussi rendre compte des étapes successives de la construction dans le temps.

1.5. Problématique de gestion de données dans le temps

La structuration des données varie d'une infrastructure à une autre, et les logiciels BIM présents sur le marché ne sont pas encore capables d'intégrer cette multitude de structuration. Aussi, le BIM met un focus particulier sur la 3D, et l'aspect gestion de données est souvent oublié. Ainsi, parmi les manques déjà identifiés dans les approches BIM traditionnelles, nous pouvons citer la difficulté à définir une structure numérique post phase d'études. En effet, la multiplicité des métiers et la durée de la phase d'usage font que le référentiel de données décrivant l'infrastructure linéaire est réparti dans un ensemble de sous référentiels de données présentant des défauts d'interopérabilité importants. Ces défauts couvrent les aspects techniques et sémantiques, et nécessitent l'utilisation d'une définition structurée des informations décrites, à travers des référentiels normalisés reposant sur les IFC.

Le PLM apparaît aujourd'hui comme aujourd'hui un fil conducteur entre les données des phases du cycle de vie dans le manufacturier. En assurant une continuité numérique des données, le PLM permet de retracer et de trouver plus facilement la donnée en erreur. Afin de gérer cette problématique de gestion de données des infrastructures linéaires, il pourrait être opportun de s'inspirer des approches PLM pour définir un cadre méthodologique applicable aux infrastructures linéaires et visant à réduire le nombre de référentiels de données dans la phase d'usage et à mieux piloter les opérations de mise à jour, préalable aux modifications opérées sur l'infrastructure linéaire réelle. A travers ces réflexions, nous chercherons plus généralement à proposer une stratégie alliant les avantages du BIM et du PLM permettant de répondre aux besoins des industries linéaires.

Conclusion

Si les différents secteurs de l'économie française ont déjà entamé leur transition numérique depuis plusieurs années, les niveaux de maturité numérique diffèrent globalement d'un secteur à un autre. Il existe notamment un décalage de maturité entre le secteur manufacturier et celui de la construction. Accompagnés par de nombreuses ESN depuis une vingtaine d'années, l'industrie manufacturière a réussi à dématérialiser ses processus d'ingénierie produit, de fabrication et de service, en s'appropriant le PLM. Son niveau de maturité lui permet de mieux suivre la définition d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie, et de la faire évoluer suivant les différents événements rencontrés tout au long du processus. Fortes de cette expérience, les ESN se sont fixé pour objectif de permettre à l'industrie du BTP d'accélérer sa transformation digitale, qui est aujourd'hui dans une phase plus précoce de son ère numérique. Aujourd'hui, le secteur du BTP adopte le BIM, et développe autour de nouveaux processus qui sont un marqueur de l'accélération de la transition numérique de la construction. A la fois maquette numérique, outils et processus, le BIM pourrait bénéficier au secteur, avec une croissance nette de la productivité. Malgré une adoption progressive, les acteurs du BTP estiment aujourd'hui le BIM assez mature pour accompagner un projet de construction de bâtiments sur toutes les phases amont (conception & chantier) jusqu'à la réception. Ce qui n'est pas forcément le cas pour l'autre division de la construction, à savoir celui des Travaux Publics, notamment les infrastructures linéaires qui a des spécificités particulières.

En quoi le BIM n'est pas assez mature pour accompagner les infrastructures linéaires ? Quels sont les moyens employés actuellement pour résoudre la question de gestion du cycle de vie d'une telle infrastructure ? Telles sont les questions qui nous guideront au cours du prochain chapitre : l'état de l'art.

Deuxième Chapitre :

Etat de l'art

II. Etat de l'art

Le chapitre précédent a servi à rappeler le contexte industriel dans lequel se situe cette thèse. Il a permis également de justifier le focus mis sur les infrastructures linéaires et leur cycle de vie. Les intérêts économiques, sociaux, techniques et politiques ressortent lorsqu'il s'agit de ce type de structure. Il s'avère toutefois important de montrer la façon dont on gère ces structures dans leur cycle de vie. Dans ce chapitre, il est ainsi question de définir les avancées industrielles en termes de gestion de cycle de vie d'une infrastructure. Que propose le BIM lorsqu'il est appliqué aux infrastructures linéaires ? Nous allons montrer les travaux du BIM appliqué aux infrastructures linéaires, leurs limites, et les pistes d'amélioration. Est-ce que le BIM répond à tous les besoins précédemment exprimés ? Qu'en est-il du PLM ? Que se passe-t-il si on associe les deux notions ? Telles sont les réflexions qui vont nous orienter tout au long de cette étude de l'état de l'art. Il se terminera par les insuffisances identifiées, ainsi que les verrous scientifiques à lever.

2.1. BIM : Du bâtiment aux infrastructures linéaires.

2.1.1. Enjeux

Après la concurrence et la course à l'innovation, un autre enjeu de la construction est le développement durable. Le secteur du bâtiment est le deuxième secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre en France [Ministère de la transition écologique et solidaire 2018]. [Papin 2020] estime que les émissions liées aux consommations énergétiques lors de la phase d'usage du BTP représentent 26% des émissions nationales. Cette estimation n'inclut pas les émissions indirectes induites par le cycle de vie des constructions et des équipements. La consommation énergétique des bâtiments représenterait 45% de la consommation énergétique nationale. En s'inscrivant de plus en plus dans une démarche de construction durable [Hoarau et Gatina 2015], les professionnels du BTP veulent limiter ou réduire l'impact écologique de toute construction, et aussi mieux gérer des ressources naturelles qui s'amenuisent. Il faut noter que, comparée au secteur manufacturier, la construction s'est relativement peu industrialisée. Pour répondre à ces besoins d'amélioration, de développement durable, d'industrialisation, ainsi qu'aux exigences de maîtrise projets de plus en plus forts, la construction a récemment amorcé une transition numérique avec de grands bouleversements dans les pratiques [Kubicki et Botton 2014; Froese et al. 2007]. L'avènement de l'approche de modélisation des données du bâtiment BIM est un des changements observés [Eastman et al. 2011]. Tendance forte de l'économie, la numérisation du travail se met en œuvre dans la construction à travers le BIM, qui en devient un facilitateur. Cette transformation est rendue possible par l'utilisation du matériel et logiciels de plus en plus puissants permettant de gérer la complexité des données, ainsi que par l'avènement de nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle.

2.1.2. Les impacts du BIM

A titre de rappel, le BIM s'appuie sur la collaboration de plusieurs acteurs dans les différentes phases du cycle de vie. Plusieurs études relèvent l'impact du BIM sur la gestion d'un projet de construction : [Boton et Forgues 2018; Lebègue et Celnik 2015; Guo et al. 2019; Smits et al. 2017; Zhou 2017]. Ces études identifient plusieurs impacts, qui sont principalement d'ordres organisationnel et économique.

2.1.2.1. Impacts organisationnels

L'implémentation du BIM implique la modification des méthodes existantes de travail et la création de nouvelles méthodes. En positionnant une maquette numérique 3D comme élément central des projets de construction, le BIM fournit des outils pour mieux organiser les processus métiers autour d'un ouvrage [Boton et Forgues 2017]. Non seulement le BIM désigne la maquette numérique 3D, mais il désigne également les changements organisationnels que cette maquette et la base de données associée sont supposées provoquer au sein des organisations [Chaudet et al. 2016]. Ce focus sur la maquette numérique n'est pas anodin. En effet, la maquette numérique est déjà utilisée, avec succès, sur les activités de conception [Darses et al. 2004], dans d'autres secteurs industriels comme l'automobile [Fonrouge 2008], l'aéronautique [Bécue et al. 2014; Mouchnino et Sautel 2007]. [Baudry 2006] présente la maquette numérique comme une plateforme collaborative permettant une intégration organisationnelle et logistique de l'ensemble des acteurs. Si on définit une maquette numérique comme une représentation géométrique 3D d'un produit pour son analyse, son contrôle et la simulation de certains comportements, le BIM n'est pas simplement la Maquette Numérique du Bâtiment, mais est une maquette numérique sémantique enrichie et partagée [Halin et Gallas 2016].

Le positionnement central d'une maquette numérique fait évoluer les méthodes d'un projet de construction. L'approche traditionnelle est séquentielle, c'est-à-dire passage de la responsabilité du projet entre différents acteurs, en fonction des phases projet. BuildingSmart France indique que les informations techniques d'un bâtiment sont ressaisies au moins sept fois au cours d'un projet de construction. Cette ressaisie implique une perte de temps et souvent une perte de données, ainsi qu'une création et propagation d'erreurs. La méthode BIM se veut concourante autour d'une maquette collaborative, et centralisée. L'ingénierie, concourante, implique alors simultanément tous les acteurs dans le processus de développement, dès le début du projet.

Un autre impact est d'ordre professionnel. Appliquer la méthode BIM à un nouveau projet de développement nécessite de réorganiser les activités autour de nouveaux rôles. En effet, le management de l'ensemble de l'information fait l'objet d'une nouvelle mission. [Sebastian 2011] cherche à répondre à cette nécessité. Les nouveaux rôles créés sont repris et analysés par [Barison et Santos 2010; Davies et al. 2017] : BIM Manager, BIM Coordinateur, ou encore

BIM Modeller. Bien que ces rôles correspondent aux besoins de management liés à la maquette numérique centralisée, leur coexistence ne semble pas totalement claire. En effet, comprendre ces nouveaux rôles BIM passe par l'analyse d'un véritable projet BIM dans lequel tous ces différents rôles sont impliqués [Boton et Forgues 2018].

2.1.2.2. Impacts économiques

L'impact économique du BIM vient de l'opportunité qu'il représente pour les différents acteurs. Pour l'architecte, le BIM permet d'avoir une meilleure présentation du travail en 3D, tout en laissant des possibilités à de nouvelles conceptions. Prenant en compte les avantages du BIM donnés au chapitre précédent, [Chelson 2010] affirme que le BIM augmenterait la productivité dans le domaine de la construction. Il reste toutefois difficile de quantifier de façon exhaustive les gains économiques du BIM, qui restent difficilement mesurables et visibles. En effet, l'investissement au démarrage du BIM et le surcoût des études ne sont pas, à tort, pris dans la balance. Les coûts sont très rarement communiqués. Si [MacGraw Hill Construction 2014] rapporte un retour sur investissement (ROI) positif (*Figure II-1*), il faut prendre en compte que le sondage est réalisé uniquement auprès des grandes entreprises de construction.

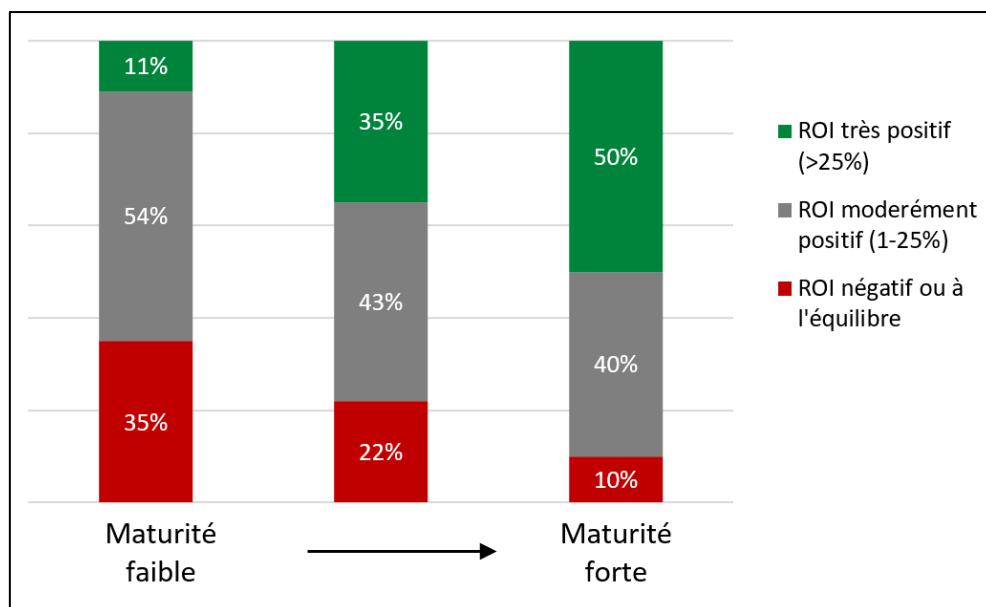


Figure II-1 : ROI global rapporté par les entreprises (Source : [OPIIEC 2016] depuis [MacGraw Hill Construction 2014])

Les études menées par [OPIIEC 2016] révèlent que les entreprises, qui utilisent progressivement le BIM, éprouvent en moyenne une perte de productivité de 15% durant la phase de montée en compétences. Pour la moitié de ces entreprises, cette phase de transition peut durer plus d'un an (*Figure II-2*). Une fois le BIM maîtrisé, la majorité de ces entreprises estiment leur gain de productivité à 5%. Toutefois, un retour sur investissement ne serait observé en moyenne que 2 à 3 ans plus tard. Une observation du marché conclut qu'une entreprise est d'autant plus productive qu'elle et ses entreprises collaboratrices sont matures sur les méthodes et outils BIM. Cette dépendance à la maturité BIM du collaborateur est d'ailleurs perçue par les ingénieries comme un frein au déploiement du BIM.

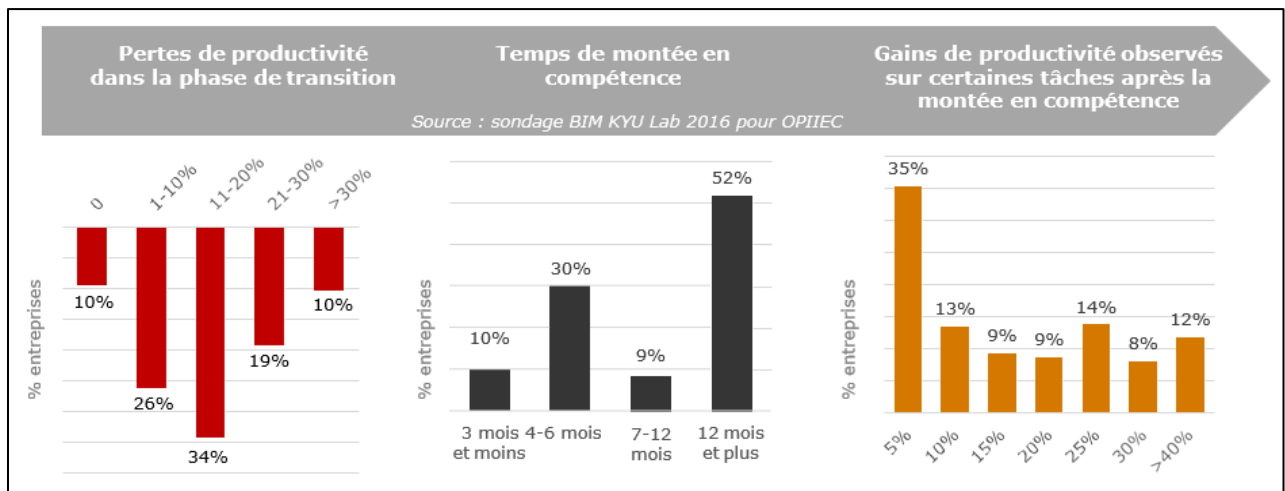


Figure II-2 : Le rythme de montée en compétences du BIM (Source : [OPIIEC 2016])

2.1.3. L'adoption du BIM

Grâce aux bénéfices potentiellement générés par le BIM, et à son amélioration des conditions de travail, on assiste à une ferveur autour du BIM. L'adoption du BIM a considérablement augmenté ces dernières années. Le BIM semble s'être d'abord développé sur les projets importants en Business To Business (hôpital, lycée...), tirés par les grandes entreprises de la construction et sur les logements tirés par des architectes précurseurs. Selon [MacGraw Hill Construction 2014], les architectes ont le plus haut niveau d'adoption et de maîtrise du BIM en Europe. Près de la moitié des architectes (46%) ont adopté le BIM, avec 42% des architectes créant des modèles BIM et 19% les analysant également. Aujourd'hui, 48% des architectes qui utilisent le BIM se considèrent avancés ou experts.

Le « boum » du BIM s'explique par le soutien des Etats. Certaines législations étrangères tendent à imposer le BIM sur des projets publics de construction comme aux Emirats Arabes Unis [Mehran 2016], au Royaume-Uni [Mandhar et Mandhar 2013], ou encore en Malaisie [Tahir et al. 2017]. Les initiatives autour du BIM ont aussi leur rôle à jouer dans l'essor de cette approche. Le consortium international BuildingSmart International cherche à mettre en place

et promouvoir des standards d'échange d'information dans le secteur de la construction (notamment les Industry Foundation Classes). Sa branche française est BuildingSmart France (anciennement appelé Mediaconstruct). Au niveau européen, on observe quelques groupes de travail qui commencent à se structurer (notamment le EU BIM Task Group). Sur un plan plus local, parallèlement au Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB) au travers duquel « l'Etat souhaite renforcer encore davantage la compétitivité, l'attractivité et l'efficacité de la filière française du bâtiment »², plusieurs industriels de grande taille comme la SNCF, Bouygues ou encore Vinci se rencontrent au sein du consortium de recherche MINnD. En contribuant au développement du BIM et à la transition numérique dans le domaine des infrastructures linéaires ainsi qu'à l'aménagement durable, ce consortium a pour objet de maîtriser et structurer les informations à échanger par tous les acteurs, sur le cycle de vie complet de l'infrastructure (conception, construction, exploitation, maintenance).

En plus de ces initiatives, il existe plusieurs travaux scientifiques qui proposent un cadre et une méthodologie d'adoption, d'implémentation et de déploiement [Arayici et al. 2011; Porwal et Hewage 2013; Succar et Kassem 2015; Gu et London 2010]. Malgré ces travaux et cette volonté manifeste pour le BIM, son déploiement est encore ralenti par quelques freins. Ainsi, avant de proposer un modèle de gouvernance du BIM utilisant une approche mixte qui tient compte de divers modes de diffusion de l'information, [Rezgui et al. 2013] identifient quelques points bloquants à l'adoption du BIM. [Beach et al. 2015] ont utilisé une théorie combinée du modèle d'acceptation de la technologie et de la diffusion de l'innovation pour explorer les facteurs affectant l'adoption du BIM. Des problèmes ont été identifiés en termes d'utilité perçue et de facilité d'utilisation du BIM complété par des facteurs liés à la compatibilité et l'avantage concurrentiel de la technologie BIM. Dans la majorité des initiatives d'adoption du BIM, les problèmes techniques (y compris la compatibilité et la fiabilité), la segmentation des équipes, la résistance au changement, le manque de formation et les problèmes liés aux processus métier sont souvent cités comme des obstacles à l'adoption du BIM [Howard et Björk 2008]. De plus, il existe une incertitude reconnue sur les aspects juridiques, contractuels du BIM [Ashcraft 2008; Bodea et Purnus 2018]. Il existe un consensus selon lequel les évolutions socio-organisationnelles et techniques devraient accompagner les efforts de déploiement du BIM [Rezgui et Miles 2011]. Cependant, là il n'y a pas de consensus quant à savoir à qui appartient le modèle BIM et qui est responsable de son financement et de sa maintenance au cours du cycle de vie de l'ouvrage [Eastman et al. 2011].

² Sylvia Pinel, Ministre du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité (2014)

2.1.4. BIM : Collaboration à travers des outils interopérables

[Sacks et al. 2010] rappellent que le processus BIM ne se limite pas au Building Information Model, le « Model » n'étant que le résultat du processus. Ces auteurs définissent le processus BIM comme une série d'actions assurées par des outils et guidées par des processus de la technologie numérique qui facilite la documentation sur le bâtiment, soit sur sa performance, sa planification, sa construction et son fonctionnement. Il est ainsi important de noter que le BIM n'est pas qu'un logiciel, c'est aussi un processus. Avec le BIM les processus de travail deviennent collaboratifs. La création et l'enrichissement du modèle est continue tout au long du cycle de développement. Chaque membre de l'équipe projet contribue à la construction de ce modèle, en fonction de son rôle et de son périmètre de responsabilité. La somme des contributions permet d'établir un modèle complet. Cette pertinence liée à une construction collaborative assure que le modèle soit aussi précis que possible pendant le projet [Carmona et Irwin 2007]. Le BIM implique non seulement d'utiliser des modèles intelligents en trois dimensions, mais également d'apporter des changements significatifs dans le flux de travail et les processus de livraison de projet [Hardin et McCool 2015]. La collaboration devient alors un pilier du BIM.

En effet, les informations produites par un logiciel donné peuvent être utilisées par d'autres logiciels, à des fins différentes telles que l'étude de faisabilité, la simulation de la lumière solaire et thermique, l'estimation des coûts et la gestion des matériaux [Abanda et al. 2015]. De ces échanges naît le besoin d'interopérabilité entre les différents outils BIM. [Steel et al. 2012] distinguent ainsi quatre niveaux d'interopérabilité entre les logiciels BIM.

- Interopérabilité de fichier, qui définit la capacité de deux outils à échanger des fichiers avec succès ;
- Interopérabilité de syntaxe, qui définit la capacité de deux outils à analyser avec succès ces fichiers sans erreur ;
- Interopérabilité de visualisation, qui définit la capacité de deux outils à visualiser fidèlement le modèle en cours d'échange ;
- Interopérabilité sémantique, qui définit la capacité de deux outils à parvenir à une compréhension commune de la signification d'un modèle échangé.

Le BIM débouche sur des propositions et des solutions d'interopérabilité à travers l'Open BIM. Il s'agit d'une approche universelle de la conception, construction et opération collaboratives d'ouvrages basée sur des normes et standards ouverts [Tchouanguem Djuedja et al. 2019]. Initiative de BuildingSmart International, l'Open BIM présente plusieurs avantages : la création d'un langage commun pour assurer la qualité de la donnée, les données structurées peuvent être réutilisées tout au long de la durée de vie d'un ouvrage, sans avoir à entrer plusieurs fois les informations. La *Figure II-3* illustre l'intérêt d'utiliser des standards ouverts. Plusieurs formats de données rendent possible l'open BIM : IFC, BCF, IFD, IDM.

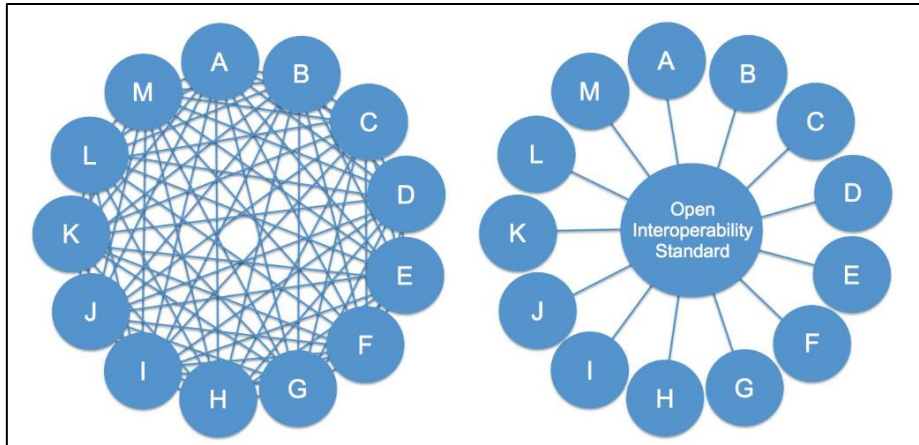


Figure II-3 : Les standards ouverts solution à la problématique d'interopérabilité (Source : [Laakso and Kiviniemi 2012])

2.1.4.1. Le format IFC Industry Foundation Classes

Le défi du monde de l'ingénierie est d'unifier l'ensemble des outils d'informations afin que tous les systèmes virtuels soient interopérables. Les problématiques d'interopérabilité évoquées au BIM de niveau 3 sont partiellement résolues par les Industry Foundation Classes (IFC). Le format IFC, défini par la norme internationale STEP (ISO 10303-21), est un format de fichier orienté-objet standardisé utilisé par l'industrie de construction pour échanger et partager les informations entre logiciels et applications de construction (logiciels de CAO architecte et ingénieur, logiciels de calculs de structure, de simulation thermique et acoustique, etc.). Il s'agit d'informations qui décrivent les objets nécessaires à la modélisation d'un ouvrage. Ils s'agit probablement du format OpenBIM le plus connu et le plus utilisé. Tous les logiciels de CAO spécialisés en architecture permettent de produire une maquette numérique et de l'enregistrer au format propriétaire de l'éditeur. Ce standard IFC s'est imposé comme le standard mondial et est désormais normalisé ISO (16739:2013). Les principales applications BIM sont capables d'importer et d'exporter les IFC. Dérivé du STEP, ce standard débute dans les années 90, et évolue jusqu'à une quatrième version (IFC1 à IFC4). La mise en œuvre des IFC se fait dans le cadre d'un référentiel unique et partagé entre tous les acteurs : la maquette numérique BIM. Leur développement est piloté à l'international par BuildingSmart International, et en France par BuildingSmart France ainsi que d'autres programmes ou initiatives comme le PTNB.

Afin de répondre au besoin d'interopérabilité du domaine de l'infrastructure, certains modèles de données basés sur IFC sont en cours de développement et de test. Par exemple, l'IFC Bridge, extension de la norme IFC concerne les ponts, est encore en développement. Une autre extension en cours IFC-Tunnel est principalement tirée par le projet allemand IFC Tunnel [Amann et al. 2013; Borrmann et Jubierre 2013] ; et le Shield-Tunnel japonais Projet [Yabuki et al. 2007]. L'IFC-Road étend le schéma IFC pour les structures routières [Lee et Kim 2011].

En outre, le consortium OpenINFRA a été fondé en 2012 au sein de BuildingSmart International pour établir les modèles IFC d'infrastructures (routes, ponts, tunnels et chemins de fer) dans la version IFC5.

2.1.4.2. Les autres formats

L'OpenBIM comprend également quatre autres normes méthodologiques, à savoir le manuel de diffusion de l'information (IDM Information Delivery Manual), le format de collaboration BIM (BCF BIM Collaboration Format), le cadre international pour les dictionnaires (IFD International Framework for Dictionaries) et les définitions de vues de modèle (MVD Model View Definition).

Le format IDM a la charge de la description des processus; il vise à fournir la référence intégrée pour les processus et les données requis par le BIM en identifiant les processus discrets entrepris dans la construction de bâtiments, les informations nécessaires à leur exécution et les résultats de cette activité.

Le format BCF assure les changements de coordination et permet d'attacher en plus des commentaires, une petite partie du modèle BIM et des vues. BuildingSmart s'occupe désormais du format BCF.

Le format IFD cartographie les éléments. C'est une sorte de langage commun afin que les applications comprennent les propriétés textes échangées. Les IFD travaillent de concert avec les IFC afin que tous les concepts et caractéristiques soient compris dans toutes les langues.

MVD traduit les processus en exigences techniques. Il ne s'agit pas d'un format proprement dit, mais d'un sous-ensemble du schéma IFC.

La transition numérique du secteur de la construction ne se limite pas uniquement à l'utilisation des technologies BIM. [Forgues et Boton 2015] évoquent une extension du BIM aux technologies complémentaires comme l'Internet des objets (IoT), le *cloud computing*, l'impression 3D, l'utilisation des capteurs intelligents, de la réalité augmentée, des technologies mobiles et le *Big Data*. Avec ces technologies, la vision du projet ne se limite plus au début de la vie de l'ouvrage, mais s'étend à tout son cycle de vie, y compris son utilisation [Wilkinson et Jupp 2016] et sa fin de vie [Won et Cheng 2017].

2.1.5. Usages du BIM

Processus reposant sur les modèles 3D, le BIM est initialement mis en place pour répondre aux besoins du cycle de vie d'un bâtiment. Un projet de construction peut ainsi faire recours au BIM pendant toutes les phases du cycle de vie d'un bâtiment. Il permet de saisir des ouvrages existants, de monter l'opération et la conception d'un ouvrage, de définir des marchés de travaux et d'exécuter le chantier, et d'exploiter et gérer le patrimoine.

2.1.5.1. BIM en phase de conception

Le BIM accompagne les projets de construction depuis la phase de conception. Il s'applique sur différents types de bâtiments : écoles/universités [Kassem et al. 2015], hôpitaux [Davies et Harty 2013; Merschbrock et Munkvold 2015], aéroports [Neath et al. 2014; Abbondati et al. 2020; Biancardo et al. 2020b], etc. Le BIM est impliqué très tôt afin d'améliorer la conception du projet. Ce qui passe par une meilleure communication des acteurs autour des objectifs communément définis. Au-delà d'une fiabilisation et accélération des échanges de données standardisées autour du BIM, [Bozonnet et al. 2018] abordent les enjeux en termes de conception intégrée. Le BIM peut être mis en place pour faire face à ces enjeux. Il suffirait de faire évoluer l'intégration des principaux outils BIM existants. Cette évolution nécessite une interopérabilité des maquettes numériques avec lesquels la correction des erreurs pourrait être perceptible, grâce à des automatismes de détection de conflits.

Un autre usage à prendre en compte en phase de conception est l'écoconception. Responsable d'une part importante des impacts environnementaux en France, le secteur du bâtiment est concerné par l'enjeu de développement durable [Lamé et Leroy 2015]. L'écoconception est une réponse à cet enjeu. Les bases de l'écoconception ont été posées au niveau international en 2002, avec la parution d'une norme ISO [ADEME 2019]. Cette norme ISO/TR 14062 précise que l'écoconception vise à « *l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits* ». Un peu plus loin, le BIM peut être utilisé pour concevoir des quartiers [Assystem 2018], et favoriser le développement des smartcities [Ugurlu et Sertyesilisik 2019]. En plus de l'ingénierie concourante, la démarche BIM rejoint la méthodologie du Lean Construction [Tauriainen et al. 2016; Hamdi et Leite 2012; Sacks et al. 2010], le Lean Construction mettant l'accent sur la réduction des déchets, l'augmentation de la valeur pour le client et l'amélioration continue.

2.1.5.2. BIM en phase d'exécution/construction

Si les efforts du BIM sont concentrés sur la phase de conception avec des logiciels et maquettes numériques BIM, il faut penser à l'utilisation future des informations de conception dans la phase de construction. Une valorisation du BIM passe par une transmission des données de la maquette numérique vers le chantier. Le passage de la phase conception à la phase EXE se définit par le transfert de responsabilité de l'utilisation de la maquette numérique. La maquette numérique de conception devient la maquette numérique d'exécution enrichie du savoir-faire des entreprises impliquées dans le process [Atlancad 2019]. Le BIM en phase d'exécution / réalisation, permet l'intégration du phasage et du budget en temps réel à partir de modèle 3D [Arlynk 2019]. Une fois le chantier lancé, le BIM renforce le lien de chaque acteur du projet. L'accès à une maquette numérique complète n'est pas forcément recommandé. En effet, les intervenants n'ont pas besoin de toutes les informations du modèle, ni des mêmes informations au même moment.

Le BIM favorise la smart construction. Nous entrons dans l'ère smart construction, c'est-à-dire une construction qui utilise les technologies de l'information et de la communication aussi bien pour optimiser la qualité des bâtiments, territoires, etc. mais aussi pour réduire ses coûts. Or, le BIM assure la continuité numérique sur toutes les missions relatives à un ouvrage. Il est donc un outil clé de la smart construction [Mediaconstruct 2019b]. Le BIM intervient sur trois aspects qui sont à prendre en compte dans cette smart construction.

- Planification les travaux en 4D : BIM pour une simulation collaborative de l'exécution [Botton 2013; Garrido et al. 2017].
- Suivi du chantier : [Forgues 2017].
- Ecoconstruction : pour limiter les déchets liés à la construction [Liu et al. 2011].

2.1.5.3. *BIM en phase d'exploitation et maintenance*

Les coûts d'exploitation et de maintenance d'un projet de construction sont souvent négligés par les parties prenantes pendant la phase de conception et de construction, malgré des preuves démontrant qu'ils contribuent à plus de la moitié des coûts totaux du cycle de vie. Cela peut augmenter jusqu'à plus de 80% pour des infrastructures importantes telles que les routes, les voies ferrées et les ponts [Pelzeter 2007]. Malgré la croissance du BIM, son adoption reste relativement faible par les acteurs de la phase d'exploitation et maintenance [Kelly et al. 2013]. Malgré les défis rencontrés par l'adoption du BIM dans cette phase (l'un des enjeux majeurs est la gestion d'actifs ainsi que la gestion de l'information tout au long de sa vie), plusieurs travaux proposent une démarche d'adoption du BIM en cette phase. Un moyen utilisé dans ce sens est l'amélioration du BIM Model. C'est en ce sens que [Heaton et al. 2019] proposent une méthodologie qui permet d'extraire des données liées au BIM directement à partir d'un modèle dans une base de données relationnelle pour l'intégration avec les systèmes de maintenance de structures existantes (comme des outils de GMAO ou de SIG). Un aspect essentiel de cette phase est la maintenance préventive et corrective. Pour comprendre comment un bâtiment se détériore, [Motawa et Almarshad 2013] visent à développer un système intégré pour capturer des informations et des connaissances à partir d'une base de données BIM. Outre les données et informations produites depuis le début de l'O&M, cette base de données doit contenir les données issues des phases antérieures du projet. Pour d'autres comme [Hitchcock et al. 2017], le défi principal est de faire face à l'absence de normes d'échange d'informations de flux de travail facilement adoptées qui documentent clairement les exigences en matière de données, les responsabilités du personnel et les flux d'échange d'informations pour prendre en charge un processus de travail spécifique à l'exploitation et la maintenance d'un ouvrage.

En plus de l'entretien du patrimoine, le BIM peut être utilisé en phase d'exploitation et maintenance pour des travaux de rénovation [Joblot 2018]. Il peut également être utilisé pour détecter les failles énergétiques d'un bâtiment [Dong et al. 2014], pour monitorer et analyser

la consommation énergétique d'un bâtiment [Fay et al. 2000], ou encore l'économie d'énergie issue du recyclage des matériaux après démolition du bâtiment [Thormark 2000].

2.1.5.4. *Le BIM pour les infrastructures*

L'adoption du BIM dans le domaine des infrastructures linéaires est plus tardive que dans celui du bâtiment. La différence principale est une différence d'échelle : les dimensions d'un bâtiment sont de l'ordre, au maximum, de plusieurs centaines de mètres, tandis que celles d'une infrastructure linéaire sont plutôt de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres. En analysant l'utilisation du BIM sur les infrastructures, [Bradley et al. 2016] concluent que les différences concernent l'intégration de l'information, l'alignement des processus BIM sur les processus métiers des constructeurs et la gouvernance efficace, la valeur et les échanges d'information. [Tolmer 2016] rajoute qu'il manque au BIM une approche plus globale qui considère à la fois l'information, la réponse aux exigences du projet et la structuration des échanges face aux différents points de vue métiers. Il précise qu'en structurant l'information (en considération des exigences et systèmes du projet et de leurs environnements), sa valeur sera améliorée. Une différence relevée dans la littérature est liée à la planification projet [Dave et al. 2013]. En effet, les techniques traditionnelles de planification et d'ordonnement des projets bâtiment ont une efficacité limitée dans les projets d'infrastructure, en raison de différences inhérentes entre les deux [Hak et al. 2006]. De plus, les techniques traditionnelles de planification, d'ordonnement et de contrôle ne répondent pas à la nature spatiale des infrastructures linéaires [Shah et al. 2009].

Malgré ces différences, le BIM est de plus en plus utilisé dans des projets d'infrastructure. Les études précédentes concernant l'utilisation du BIM dans ces projets étaient en général principalement axées sur le développement et la coordination à venir de leurs usages fonctionnels. La plupart d'entre eux étaient liés à des projets de conception et de construction de routes et autoroutes [Sibert 2013; Tang et al. 2020; Biancardo et al. 2020a], ou de voies ferrées [Chen 2018; Bensalah et al. 2018], ainsi qu'à la conception [Mao et al. 2015] et à la maintenance [Marzouk et Abdel Aty 2012; Chen et al. 2020; Yin et al. 2020] des tunnels de métro, des ponts [Eslahi et al. 2020] ou encore des pipelines [Ji et al. 2013].

2.2. PLM : Du produit aux infrastructures linéaires

La gestion du cycle de vie des produits (PLM) est souvent décrite comme le successeur de la gestion des données produits (PDM) pour de nombreuses raisons. Elle englobe et élargit le champ des fonctionnalités et fournit une image plus globale de la situation. Bien que le concept ait émergé au début du siècle, il n'a atteint sa maturité qu'au cours de la dernière décennie. La définition donnée par [Terzi et al. 2010] est assez éclairante. Ils le définissent comme étant une stratégie d'entreprise pour créer et soutenir un environnement de connaissances

centré sur le produit. Il est enraciné non seulement dans les outils de conception et les systèmes de coffre-fort de données, mais également dans les systèmes d'assistance à la maintenance, à la réparation et au retrait des produits. Il en ressort qu'un environnement PLM permet la collaboration et la prise de décision éclairée par les différentes parties prenantes d'un produit sur son cycle de vie. [Holligan et al. 2017] consacrent une partie de sa revue à comparer les avancées des « approches académiques » par rapport à l'état actuel des « systèmes commerciaux » des éditeurs de logiciels. Ils soulignent le fait que ces systèmes n'offrent cependant pas de plateforme PLM holistique couvrant tous les aspects du cycle de vie du produit. Conscients de leur limitation technique, les éditeurs de logiciels tentent alors de restreindre la définition du PLM au logiciel, dans le but d'asseoir leur stratégie commerciale.

Par conséquent, nous ne considérerons que la définition PLM qui prend en compte non seulement les technologies de l'information et de la communication (TIC), mais aussi de nombreuses phases du cycle et les parties prenantes. Approche technologique et organisationnelle permettant la gestion efficace des processus de développement et de création de produits, le PLM a cheminé vers des secteurs différents du manufacturier. [Abramovici 2007] avait déjà identifié le secteur de la construction comme domaine probable d'application du PLM. Le PLM intervient petit à petit en construction car présenté comme système proposant un stockage, un transfert et une gestion pérenne d'informations produit [Min et al. 2008]. Les concepts PLM peuvent aussi être utilisés pour réduire les erreurs en phase de conception [Migilinskas et Ustinovičius 2006]. En raison des différents besoins, processus métier et activités d'ingénierie diverses telles que la conception, l'analyse structurelle, l'installation de simulation, la gestion des documents et des données, un nouveau paradigme pour les entreprises de construction est nécessaire pour gérer et partager l'ensemble du flux de travail et des informations dans le cycle de vie total du projet. C'est pourquoi [Kang et al. 2010] proposent un système C-PLM (Construction – PLM), un système PLM pour une gestion efficace des projets civils et des activités d'ingénierie. Toutefois l'utilisation du PLM en construction est limitée au projet de bâtiments. En effet, il n'existe que peu de travaux sur les infrastructures linéaires, où l'usage du PLM est évoqué sans être associé au BIM. Un des rares travaux nous vient de [Zheng et al. 2017]. Ils évoquent le manque de maturité du BIM appliqué à un projet ferroviaire, en raison du manque d'exigences spécifiques ; et proposent une gestion de process de conception, de construction, d'exploitation et maintenance à travers une approche PLM.

2.3. Approches issues de deux secteurs économiques différents

Le PLM a montré son efficacité au sein de l'industrie manufacturière pour la gestion de différentes expertises à travers un système d'information commun. [Jupp 2016] rappelle que ces progrès n'ont pas encore été égalés dans l'industrie de la construction. Il n'y a que quelques efforts documentés de mise en œuvre de systèmes PLM dans les entreprises d'architecture, d'ingénierie et de construction [Aram et Eastman 2013]. Cela peut s'expliquer par les particularités de l'industrie de la construction [Jupp et Nepal 2014]. [Green et al. 2005] ont

proposé une comparaison entre les industries de la construction et de l'aérospatiale. Ils fournissent une représentation précise des différences de contexte entre ces industries et identifient deux éléments majeurs pour analyser ces différences: les différences structurelles et la relation avec le gouvernement. Bien que la construction soit cadrée par certaines réglementations comme la loi MOP, la répartition des acteurs autour de sa chaîne de valeur est très fragmentée en phase projet. Au sein de l'industrie aérospatiale en revanche, les acteurs sont plus intégrés. Par exemple, la chaîne de certification dans la fabrication d'un avion impose de figer la chaîne de sous-traitance, alors que cette chaîne est moins contrainte dans le secteur du bâtiment.

Une autre différence est le produit final lui-même. Si le secteur manufacturier se concentre sur la production de masse, le prototypage physique et la réutilisation, l'AEC ne le fait pas. Avec ces spécificités, ces dernières années ont vu le développement du BIM comme le soulignent [Lemaire et al. 2019]. Le BIM n'est pas une simple maquette numérique, ce n'est pas non plus un logiciel. C'est avant tout un processus dont les fondements mêmes reposent sur une amélioration des échanges entre les parties prenantes. Le Building Information Modeling est une approche basée sur des modèles pour concevoir, construire, exploiter et entretenir des bâtiments. Le modèle qui constitue le cœur de l'approche BIM est un modèle 3D partagé et calculable du bâtiment qui permet de surmonter les lacunes d'une approche papier 2D. Le BIM est donc une méthodologie qui facilite la collaboration multidisciplinaire et la gestion de l'information entre les différents acteurs du projet [Jupp 2013]. Avec les IFC, le BIM permet de représenter un ensemble structuré d'informations sur un bâtiment existant ou prévu. Le BIM propose donc une plateforme collaborative entre différents acteurs du bâtiment, permettant l'interopérabilité entre différents logiciels métier via les IFC.

Cette nouvelle façon de construire conduit à un positionnement inédit des enceintes et crée de nouvelles voies d'échange. Le BIM est donc une véritable révolution dans le secteur de la construction, comme l'était le PLM à ses débuts dans la fabrication. Le BIM et le PLM ont déclenché des changements fondés sur la pratique en apportant de nouvelles activités professionnelles, rôles et responsabilités, compétences en connaissances et relations avec les parties prenantes [Jupp et Nepal 2014].

2.4. Comparaison BIM et PLM

La notion du BIM est très souvent accompagnée de celle du PLM. Plusieurs études dont [Mangialardi et al. 2017] les associent à travers plusieurs types de relations. Définis comme systèmes, approches ou modèles, ils partagent certaines similitudes et certaines différences. En notant les changements qu'ils impliquent dans leur domaine d'application, [Jupp et Nepal 2014] établissent leur rapprochement par rapport à leur approche du partage de données, de la gestion de projet, de l'organisation des équipes autour des livrables et des échéanciers et

des activités de visualisation basées sur les objets. [Kubler et al. 2016] affirment qu'ils partagent beaucoup de similitudes mais diffèrent lorsqu'il s'agit de parler d'intégration organisationnelle et technique. C'est également dans ce sens que vont [Jupp et Singh 2014], en affirmant que les deux concepts partagent des similitudes fondamentales mais se distinguent par leur portée et leur niveau d'intégration ainsi que par la maturité de la gestion des processus et des flux de travail. Ces points de rapprochement peuvent être déclinés en quatre catégories :

- La maquette numérique : Si on va sur une base du BIM de niveau 2, BIM et PLM gèrent une maquette numérique centralisée. [Nöldgen et al. 2015] disent qu'il s'agit de modèles virtuels comparables. Ainsi les principes PLM de gestion centralisée de données peuvent être applicables au BIM.
- Partage de la donnée : Autour de la maquette centralisée, plusieurs métiers et collaborateurs peuvent extraire des données ou modèles correspondant à leurs besoins de travail. [Desprat et al. 2015] les considèrent comme deux applications collaboratives. Ce partage d'informations entre différents outils ou logiciels est possible grâce à l'interopérabilité, assuré en BIM et PLM respectivement par des formats IFC et « Standard for the Exchange of Product model data » STEP.
- Structuration outils : Les deux concepts partagent la structuration de leurs outils. La plupart du temps, une plateforme accessible en mode web, reliée à une base de données, autour de laquelle des outils métiers peuvent extraire et ou modifier une maquette centralisée, ou alors juste la visionner à l'aide des viewers.

Concernant leurs différences, [Jupp et Singh 2014] montrent que les deux concepts se distinguent par leur portée et leur niveau d'intégration ainsi que par la maturité de la gestion des processus et des flux de travail. [Reefman et Nederveen 2012] affirment que le BIM est un PLM immature. Pour [Aram et Eastman 2013], le PLM est une plateforme unificatrice pour les données produites par des outils de création basés sur le BIM. Aussi, [Popov et al. 2006] attribuent un aspect statique de la construction au BIM tandis qu'il y voit une vue plus dynamique de la construction dans le PLM. Mais cette attribution est contradictoire avec le BIM 4D, qui est une gestion de la maquette numérique de construction dans le temps. Il ressort ainsi que le BIM est un outil passif permettant de déterminer l'état du bâtiment à un instant donné, tandis que le PLM permet de connaître la nature et la date des modifications apportées. Cette distinction révèle une certaine complémentarité. C'est en ce sens que leur association pourrait faciliter une gestion complète de l'infrastructure sur l'ensemble de son cycle de vie.

Ce qui ressort de certaines comparaisons est le fait que le BIM peut s'inspirer du PLM. Des recherches antérieures ont également adapté les fonctionnalités du système PLM aux défis existants et non encore résolus (intégration du flux et de la gestion de l'information entre toutes les parties prenantes) face au déploiement du BIM [Jupp 2013]. Les fonctionnalités

identifiées sont la gestion des documents et modèles de conception et de processus, la construction et le contrôle des dossiers de nomenclature (structure du produit), la mise à disposition de référentiels de fichiers électroniques, l'inclusion de métadonnées de documents et de modèles, l'identification du contenu du modèle pour la conformité et la vérification. L'activation de la gestion des flux de travail et des processus pour approuver les changements, le contrôle d'accès sécurisé ainsi que les contrôles d'exportation des données sont des fonctionnalités qui s'avèrent également intéressantes. De plus, les développements récents concluent que le BIM et le PLM sont complémentaires. En effet, là où le BIM se concentre sur la visualisation, les calculs des propriétés, le contrôle des interactions entre les différents éléments, le PLM adresse en plus les processus de validation (workflows) des données, d'échange, et de traçabilité de tout changement sur la structure, ainsi que la gestion de coffre-fort de données. Utilisés ensemble, PLM et BIM pourraient couvrir tous les aspects de la gestion d'un projet de construction. Cette complémentarité a été proposée pour gérer certains projets ou produits spécifiques, les infrastructures linéaires [Tchana de Tchana et al. 2018] et le démantèlement nucléaire [Cheutet et al. 2018] par exemple.

2.5. Jumeau numérique

2.5.1. Définitions du jumeau numérique

Il existe un certain nombre de limitations avec les modèles BIM actuels, qui se composent essentiellement de représentations CAO. Ils n'intègrent pas les différentes configurations d'une nomenclature, notamment EBOM (Engineering Bill Of Materials) ou alors MBOM (Manufacturing Bill Of Materials). Une fois l'infrastructure construite, ces modèles ne permettent donc pas de suivre la trace numérique des évolutions liées aux opérations. Il existe donc un intérêt à relier les différents modèles (modèle de conception, modèle du tel-que-construit, et modèle d'usage). Aussi, [Matarneh et al. 2019] relèvent que les modèles BIM ne sont pas appelés à reproduire le comportement en temps quasi réel de l'actif une fois en service ou en cours d'utilisation. Il existe pour cela de nombreuses informations du bâtiment et de ses sous-systèmes qui enrichissent ces modèles BIM à travers l'intégration de nouveaux systèmes tels que IoT ou BAS (Building Automation System ou système d'automatisation du bâtiment). Ces systèmes fournissent des outils pour capturer, stocker et partager des informations critiques sur le bâtiment [Tang et al. 2019]. Par conséquent, il y a beaucoup de place pour l'amélioration de ces outils, à la fois comme base pour combiner le BIM avec d'autres systèmes d'information, comme des applications qui interrogent les bâtiments pendant l'exploitation et la maintenance [Ilter 2015; Bradley et al. 2016], et des applications qui fournissent des objectifs prédictifs pour prévoir le comportement et les performances futurs des actifs [Gerrish et al. 2017; Saieg et al. 2017]. Pour cette raison, on pourrait dire qu'un modèle d'information du bâtiment fournit la base d'un jumeau numérique, car il reproduit un large ensemble de caractéristiques des actifs qui permettent des simulations de comportement futur [Shou et al. 2015], mais il

ne fournit pas des liens physiques numériques directs pour relier des informations sur le comportement ou l'état actuel et, ne servent pas d'outil d'exploitation virtuel [Lu et al. 2020].

Parmi de nombreuses définitions, un jumeau numérique peut être essentiellement décrit comme une représentation numérique d'un système physique réel : caractéristiques physiques, fonctionnalités, état, comportements, historique des activités. Il est alimenté par des bases de données de référence et des capteurs installés sur l'infrastructure, qui lui permettent d'être mis à jour tout au long de son cycle de vie. [Glaessgen et Stargel 2012] l'ont défini comme une simulation probabilistique multi-physique, multi-échelles et intégrée d'un produit complexe, utilisant les meilleurs modèles physiques disponibles, des mises à jour de capteurs, pour refléter la vie de son jumeau correspondant. Bien que certaines organisations aient le sentiment de travailler avec un jumeau numérique depuis de nombreuses années, cela reste, pour la majorité, un nouveau concept qui changera leurs organisations de travail. Pendant la phase de conception, des représentations virtuelles sont réalisées à l'aide de maquettes numériques. C'est en ce sens que l'on pourrait assimiler la maquette numérique au jumeau numérique. La maquette numérique est une composante du jumeau numérique. [Madni et al. 2019] font la différence entre un jumeau numérique et un modèle CAO. En effet, là où le modèle CAO se concentre sur la représentation géométrique et comportementale 3D du produit, l'essence d'un jumeau numérique est la connexion et la synchronisation entre les données relatives au produit physique et les informations contenues dans le produit virtuel. Cette synchronisation peut se faire avec des objets connectés placés stratégiquement sur le produit réel. Quand on parle de jumeau numérique, l'Internet des objets et le fil conducteur numérique sont incontournables. Comme le rappellent [Madni et al. 2019], ce fil numérique assure la connectivité tout au long du cycle de vie du système et collecte les données du jumeau physique pour mettre à jour les modèles du jumeau numérique. Ainsi, le jumeau numérique devient une représentation précise et actualisée d'un système physique qui reflète également le contexte opérationnel du jumeau physique. Construit sur la base d'une superposition de plusieurs données existantes, le digital twin offre un aperçu visuel des performances via des entrées de données continues. Ces définitions ne définissent qu'a posteriori les usages du jumeau numérique. Aussi, elles ne définissent pas le niveau de détails d'information que doit contenir et représenter un jumeau numérique. La définition de notre jumeau numérique donnée au quatrième chapitre est construite et enrichie à partir des cas d'usages métiers de l'infrastructure linéaire qu'il représente.

2.5.2. Evolutivité du jumeau numérique

Il est possible d'appréhender le jumeau numérique à travers son évolution. L'évolution du digital twin suit le cycle de vie du produit physique. Avec des interprétations larges de ce qu'est un jumeau numérique, plusieurs questions se posent. L'un d'eux est de savoir quand parler de digital twin. Pour [Madni et al. 2014], un jumeau numérique est créé pour la pre-

mière fois lorsque le système physique peut commencer à fournir des données réelles au modèle virtuel, c'est-à-dire lorsque le fil numérique est effectivement établi. Ainsi, sur la base des flux d'échange de données, [Kritzinger et al. 2018] recontextualisent les concepts de modèle numérique, d'ombre numérique et de jumeau numérique, en fonction du degré d'intégration des données (Figure II-4) :

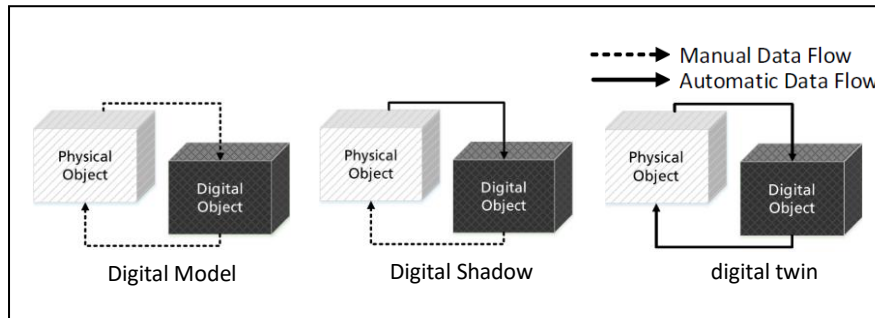


Figure II-4 : Evolution du Jumeau Numérique selon [Kritzinger et al. 2018]

- Modèle Numérique (Digital Model) : une maquette numérique qui n'utilise aucune forme d'échange de données automatisé entre l'objet physique et l'objet numérique.
- Ombre Numérique (Digital Shadow) : sur la base de la définition d'un modèle numérique, il existe un flux de données unidirectionnel automatisé entre l'état d'un objet physique existant et un objet numérique. Ce qui est possible dès la phase de construction.
- Jumeau Numérique (Digital Twin) : Si plus loin, les données intégrées circulent dans les deux sens entre un objet physique existant et un objet numérique, on pourrait l'appeler digital twin. Dans une telle combinaison, l'objet numérique peut également agir en tant qu'instance de contrôle de l'objet physique. Il peut aussi y avoir d'autres objets, physiques ou numériques, qui induisent des changements d'état dans l'objet numérique. Un changement d'état de l'objet physique conduit directement à un changement d'état de l'objet numérique et vice versa.

Comme cette dernière, une autre recherche donne des noms différents à cette notion de jumeau virtuel, selon le cycle de vie. [Grieves et Vickers 2017] distinguent par exemple deux composants du digital twin : un digital twin Prototype (avant que le physical twin existe) et une digital twin Instance (représentant une instance d'un produit physique), tous deux gérés dans un digital twin Aggregate (agrégat de nombreux jumeaux numériques). Pendant ce temps, [Chinesta et al. 2018] ont introduit les concepts de jumeau virtuel, de jumeau numérique et de jumeau hybride. Par conséquent, un jumeau numérique fait référence à une réplique numérique d'actifs physiques existants ou futurs (jumeau physique), processus, des personnes, des lieux, des systèmes et des appareils pouvant être utilisés à diverses fins. Un objectif général du jumeau numérique est d'améliorer les performances d'un actif en tirant

parti des opportunités de simulations et des retours d'expérience de la vie réelle dans les opérations et dans la conception. La définition du digital twin dépend alors pour chaque fabricant de l'usage qui en est fait. [Tao et al. 2019] ont proposé qu'un jumeau numérique nous permette, entre autres, de réaliser la modélisation et la simulation de systèmes complexes (intégration de la modélisation multi-physique), améliorer la performance globale des systèmes complexes ; fiabilité, surveillance et analyse accrues.

2.5.3. Du BIM au jumeau numérique

Les complexités de la construction sont liées à la multitude d'informations 2D, réparties entre plusieurs équipes multidisciplinaires. Cela conduit parfois à une mauvaise communication entre eux et ne convient pas aux projets complexes. Bien que [Lemaire et al. 2019] disent que ces dernières années ont vu le développement du BIM, son origine est venue du professeur Charles Eastman de la Georgia Tech School of Architecture en 1970. [Latiffi et al. 2014] montrent comment le développement de la définition BIM a été étendu à différentes perspectives. De la seule application de conception dans les années 1970, le BIM est aujourd'hui utilisé comme une approche méthodologique centrée sur les données pour encourager l'intégration d'équipes multidisciplinaires dans des projets de construction, d'urbanisme et de gestion d'actifs. Les innovations attendues par le BIM permettent au secteur une forte croissance et d'importantes perspectives de développement [Ustinovičius et al. 2015]. Ces innovations couvrent les aspects méthodologiques et techniques et ont des implications importantes pour les usages [Sebastian 2011; Davies et al. 2017].

Les données sur les bâtiments et les structures deviennent de plus en plus complexes et abondantes, tout comme le nombre d'outils et de formats de données qui augmentent rapidement. Il est donc difficile pour le BIM de générer des informations exploitables à partir de différentes sources de données fournies par différents outils. Malgré cette reconnaissance, les tableaux de bord logiciels actuellement utilisés continuent de fonctionner uniquement sur les graphiques à barres et à secteurs traditionnels pour afficher l'état du système et les informations sur l'état, ignorant largement les outils de données et les services que les propriétaires d'immeubles utilisent aujourd'hui. Il est donc nécessaire de disposer d'un outil de tableau de bord de plus en plus sophistiqué permettant aux utilisateurs de visualiser en temps réel ce qu'ils doivent savoir sur leurs projets et leurs propriétés dans une forme et un format pratiques. C'est ainsi que le digital twin gagne du terrain dans le secteur de la construction avec un accès en temps réel aux données du système, ce qui est essentiel pour des fonctions telles que la gestion adaptative de l'alimentation. Bien qu'il puisse être utilisé dès les phases de conception et de construction, les effets positifs du digital twin seront remarqués lors de la phase d'exploitation et de maintenance (O&M).

Le BIM gère de nombreux aspects du projet de construction: plans, visualisation géométrique, temps et planification, coût, développement durable, cycle de vie. Parlant du cycle de vie, [Lévy 2011] associe deux niveaux d'information : le niveau de détail (Level of Details LoD)

et le niveau de développement (Level Of Development **LOD**). Ces niveaux sont présentés pour spécifier la fiabilité et articuler un haut niveau de clarté du contenu des modèles 3D à différentes étapes [Latiffi et al. 2014]. Si le niveau de détail est la quantité de détails inclus dans les éléments de modèle de bâtiment [Leite et al. 2011], le niveau de développement est le degré auquel la géométrie de l'élément et les informations associées concernant les composants de la structure ont été pensées par les constructeurs lors de l'utilisation du modèle [Weygant 2011]. Le LOD est une sortie fiable après la phase de construction [Love et al. 2013]. Il est utilisé pour couvrir de nombreuses incohérences qui se produisent dans la phase de conception [Porwal et Hewage 2013] car il est facile de se méprendre sur la précision d'un élément à modéliser [Reddy 2011] étant donné les différents LOD rappelés par [Latiffi et al. 2014], nous sommes en mesure de les associer à une définition de digital twin (*Tableau II-1*).

Phases projet selon la loi MOP		Niveau de développement (LOD) du BIM	Jumeau Numérique selon [Kritzinger et al. 2018]	Jumeau Numérique selon [Grieves et Vickers 2017]	Jumeau Numérique selon [Madni et al. 2019]
Conception	ESQ Etudes d'esquisse	2D	Digital Model	digital twin Prototype	Pre-digital twin
	AVP Avant-projet	LOD 100 Représentation des encombrements géométriques			
	PRO Etudes projet – définit la mission et sélectionne les équipes de construction	LOD 200 Définition & association des propriétés non géométriques à la 3D			
Construction	ACT Passation des contrats de travaux	LOD 300 Des objets génériques à des objets spécifiques			
		LOD 350 Interactions entre éléments			
	EXE Etudes d'exécution - définit le coût et les étapes de construction	LOD 400 Haut niveau de détail nécessaire à la construction du chantier			
	DET Direction d'exécution des travaux				
	OPC ordonnancement, de coordination et de pilotage du chantier				
AOR Assistance MOE lors des opérations de réception	digital twin				
O&M	O&M Exploitation et Maintenance	LOD 500 Représentation du as-built => DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés.	Digital Twin	digital twin Instance	digital twin Adaptative digital twin Intelligent digital twin

Tableau II-1 : Correspondance entre LOD et évolution du jumeau numérique

Conclusion & contributions vis-à-vis de l'état de l'art

L'état de l'art ne permet pas de couvrir toutes les exigences liées à la gestion des infrastructures linéaires. Cette gestion implique de multiples besoins en termes de gestion de données. Respectivement process de gestion de maquette numérique et de données, le BIM et le PLM sont présents dans le domaine des infrastructures linéaires. Le premier reste limité sur les projets d'infrastructures en raison de la taille du projet. En effet, la prise de décision peut s'y effectuer sur différentes échelles, de plusieurs kilomètres pour les tronçons de routes, aux centimètres pour les assemblages des boulons par exemple. Une modélisation multi-échelles s'impose alors [Mao et al. 2015]. Aussi le BIM ne prend pas en compte la diversité des infrastructures linéaires. Certaines spécificités des infrastructures autres que les bâtiments ne sont pas prises en considération dans les normes actuelles du BIM. L'approche PLM, elle, ne concerne pas initialement le domaine de la construction. Facilitateur de la gestion des informations sur un cycle de vie, le PLM est souvent associé au BIM dans des projets de construction.

L'association et la complémentarité BIM-PLM ne propose pas d'approche globale du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Les recherches traitent dans la plupart des cas d'une adaptation des méthodes développées pour la construction de bâtiments et se limitent à l'élaboration de référentiels de données pour le développement de la collaboration inter métier. Cela résulte en la prise en compte des besoins des phases d'études de l'infrastructure mais rend difficile la prise en compte de la gestion de l'infrastructure dans le temps. Ce second aspect est cependant adressé à un niveau assez global, éloigné de l'usage dédié aux infrastructures linéaires [Rezgui et al. 2013].

Un verrou technique en instance de résolution est le développement des IFC relatifs aux infrastructures linéaires. A l'heure actuelle, il n'existe pas de format d'échange IFC mature pour les infrastructures linéaires. Celles-ci sont en préparation et devrait permettre de structurer encore mieux les données et maquettes numériques 3D des infrastructures linéaires. Pour le moment les formats propriétaires des éditeurs de logiciels sont utilisés pour les échanges de données. Loin de résoudre ce verrou technique, les travaux de recherche liés à cette thèse proposent un système global de gestion continue de données des infrastructures linéaires, prenant en compte la longueur du cycle de vie d'une infrastructure linéaire.

Troisième Chapitre :

Gestion du cycle de vie

d'infrastructure

linéaire

III. Gestion du cycle de vie d'infrastructure linéaire

L'introduction générale et la présentation du contexte industriel de cette thèse nous ont positionné sur la transformation numérique du monde de la construction, et plus spécifiquement celui du domaine des infrastructures linéaires. L'état de l'art au Chapitre 2 nous a permis de constater des limites du PLM et du BIM lorsqu'ils sont appliqués séparément, et bien même lorsqu'ils sont associés, sur des projets d'infrastructures linéaires. Mais à partir des similitudes aux produits manufacturiers et aux bâtiments, l'on peut concevoir nécessairement un nouveau système, à base de PLM et de BIM, qui va permettre de gérer le cycle de vie des infrastructures linéaires.

Il s'agit d'abord de définir plus précisément une infrastructure linéaire, sa décomposition produit, ses exigences, ses besoins, la gestion de ses données, son cycle de vie, ainsi que les acteurs projets. De cette décomposition, son cycle de vie aura des points de convergences avec ceux des produits et ceux des bâtiments. Face à leur pluralité de type, il sera question dans ce chapitre de donner un cadre général et commun au plus grand nombre d'infrastructures linéaires. L'enjeu est de faciliter la gestion de données sur le long terme, ainsi que la collaboration autour des données, pour un partage entre tous les acteurs d'un projet. Ainsi seront définies les bases d'un système ou d'un outil de gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Cette définition se reposera sur trois angles de vues : objets, acteurs et process. Ce volet nous permet ainsi de donner le cadre et les limites du terme cycle de vie appliqué à une infrastructure linéaire. Ce qui nous conduira, au Chapitre 4, à définir les briques fonctionnelles d'un système de gestion.

3.1. Structuration de données et acteurs

Il existe plusieurs verrous à traiter quand il vient à modéliser les données d'une infrastructure linéaire. Les outils méthodologiques actuels liés au BIM ne sont pas suffisamment développés pour le faire (IDM Information Delivery Manual, Model View Definition MVD, IFD, IFC). Comme le rappelle [Tolmer 2016], la définition d'une structuration des données repose non seulement sur des outils conceptuels (pour appuyer la réflexion et conserver une cohérence entre les parties de modèle utilisée) mais aussi sur des méthodologies d'analyse (pour identifier les éléments pertinents à extraire du modèle global en fonction des exigences identifiées au préalable). Précurseur du programme MINND, le projet de recherche COMMUNIC (Collaboration par la Maquette Multi-Usage Numérique et l'Ingénierie Concourante), qui concerne les infrastructures, avait pour but d'organiser les technologies pour favoriser le travail collaboratif et la structuration de données. Regroupant les leaders du domaine de la construction ainsi que des laboratoires de recherche, il s'agit d'un des premiers projets qui décrivent un modèle technologique et organisationnel qui soutiendra le travail collaboratif à travers un

modèle numérique partagé. Sur la base des travaux du projet COMMUNIC, notre intérêt porte ici sur la structuration et la modélisation des données, des acteurs et leurs usages, ainsi que les outils et formalismes méthodologiques dans une optique d'ingénierie collaborative et courante.

3.1.1. Structure « Produit »

Une structure ou arborescence produit est une représentation sous forme d'arbre de l'ensemble des objets, pièces ou articles qui composent l'infrastructure linéaire. Aussi connue sous le nom Bill Of Materials (BOM) dans le jargon PLM, cette décomposition établit une hiérarchie entre les composants. Un objet représente un composant réel qui a été ou sera fabriqué ou construit. L'avantage d'une décomposition en objets est l'amélioration de la cohérence et la consistance de l'information. En effet, des informations sont rattachées à ces objets : définition géométrique et volumique, attributs, ainsi que liens et relations avec d'autres objets. Ce sont donc ces objets qui portent les informations de base qui seront gérées dans le système de gestion de cycle de vie, informations qui doivent être accessibles et modifiables par les différents contributeurs au projet sur un support commun de données. La structure produit permet ainsi l'échange d'informations. La structuration en objets de l'infrastructure linéaire représente le point de départ du projet de construction. Ainsi sont définies, stockées et manipulées les informations de base de l'infrastructure concernée. La structuration peut se faire de plusieurs façons parmi lesquelles :

- Une décomposition longitudinale et transversale
- Une structuration par niveau d'information

3.1.1.1. *Décomposition longitudinale et transversale*

Dans un contexte de gestion de données de chaussées tout au long d'un cycle de vie, un cas d'usage du projet MINND [MINND 2015] a défini une structure opérationnelle qui permet de suivre l'évolution des exigences au fur et à mesure du projet d'une nouvelle chaussée. Cette structure n'étant pas pérenne, il est recommandé de modéliser une architecture permettant de suivre la définition de la chaussée dans son ensemble. Le choix est fait ici de dissocier le découpage longitudinal de la chaussée de son découpage transversal (*Figure III-1*). Cette modélisation de l'architecture d'une chaussée autoroutière s'applique bien à une vue de définition. En revanche, cette vue présente un niveau de détails et une organisation qui ne correspondent pas aux besoins de représentation de la chaussée tel qu'elle sera construite. Le fait est que les acteurs de la phase de conception définissent des performances locales à atteindre suivant un découpage fin. Les acteurs de la construction ont la charge de proposer une solution qui répond globalement à l'ensemble des attentes, en respectant également des exigences de performance financière. Ils peuvent donc être appelés à modéliser la chaussée dans

une vue différente. La traçabilité entre les différentes représentations devra se faire à travers la gestion des vues. Un mécanisme de consolidation de l'information est nécessaire.

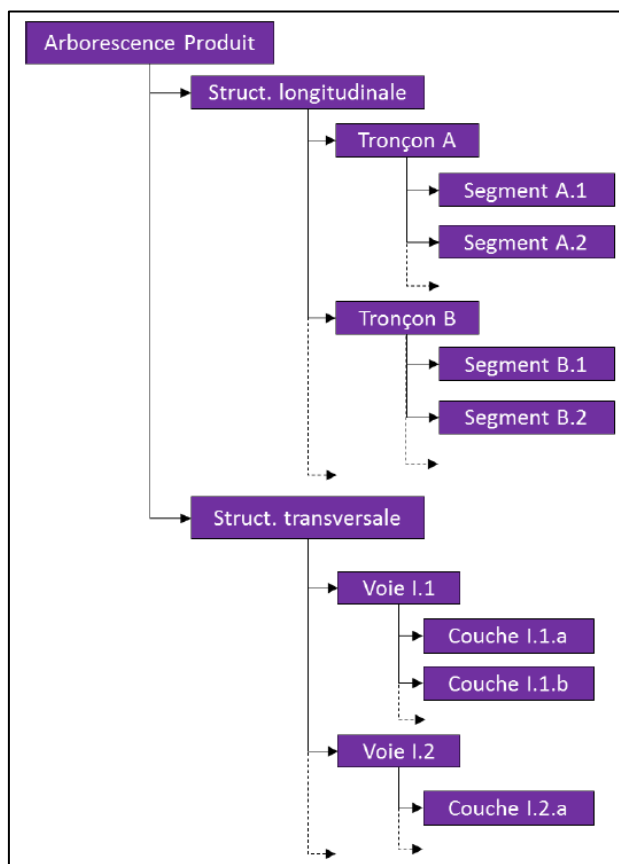


Figure III-1 : Architecture produit d'une chaussée (Source : [MINND 2015])

L'avantage de cette représentation est la possibilité de voir et de gérer l'infrastructure linéaire suivant deux axes, et ainsi prendre en compte sa linéarité, ainsi que les problèmes d'échelle. Ce mécanisme permet de réduire le découpage des sous-éléments de la chaussée. Ainsi, on alimente l'arborescence suivant les différents contextes. On reconstruit l'ensemble des informations par filtration sur le contexte. Aussi, il est proposé de définir un contexte d'applicabilité suivant le Point Kilométrique (Pk). Pour ce faire, on définit les plages d'applicabilités de chaque élément (Figure III-2).

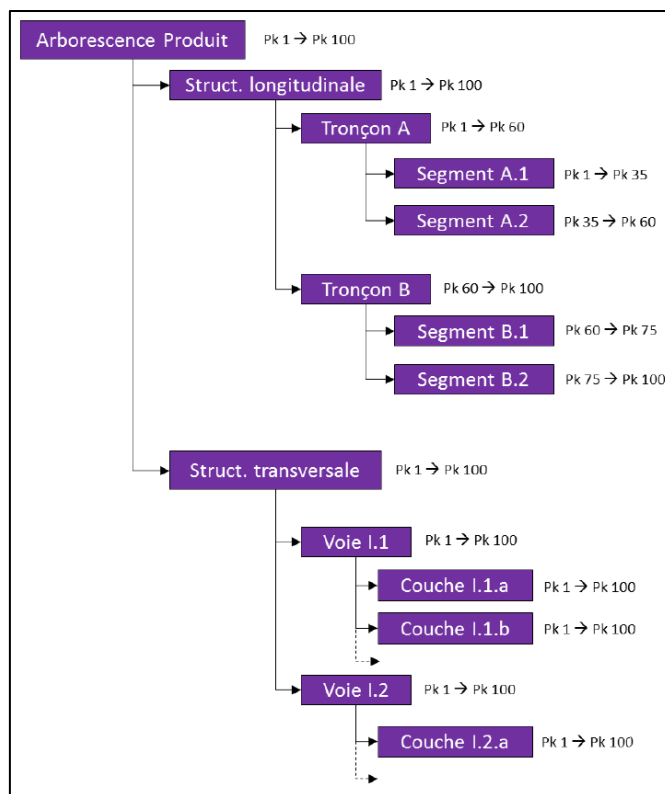


Figure III-2 : Définition d'applicabilités sur l'architecture de la chaussée (Source : [MINND 2015])

Pour retrouver les informations propres au contexte, on filtre sur le point kilométrique en question (par exemple Pk 10). On peut également filtrer sur une plage kilométrique (par exemple Pk 60 - Pk 70), comme l'illustre la Figure III-3.

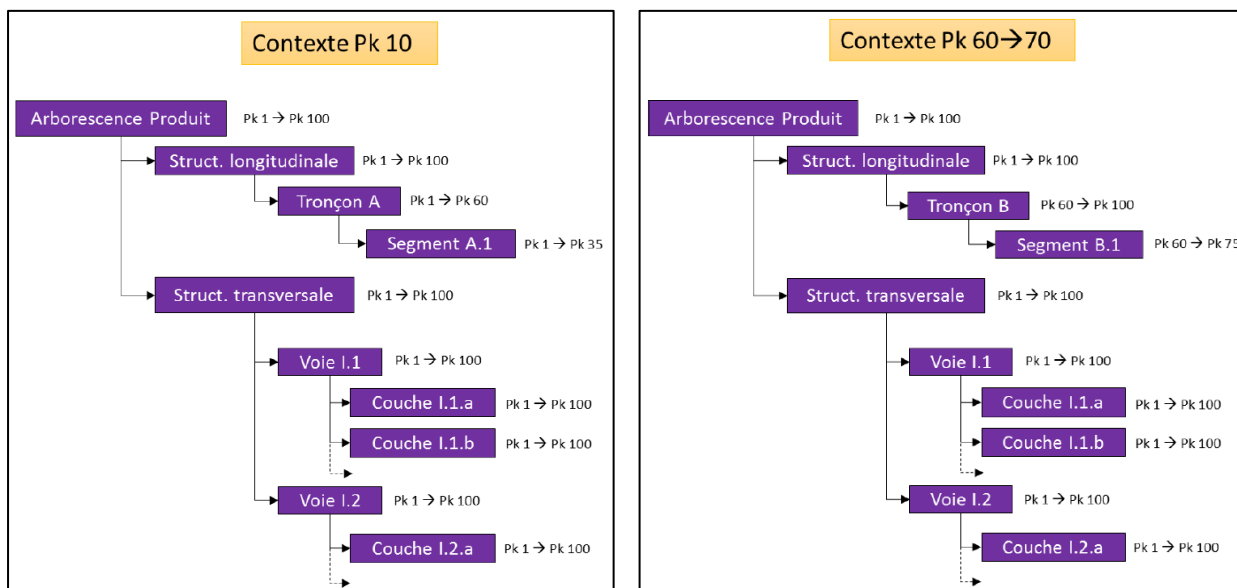


Figure III-3 : Architecture de la chaussée en contexte (Source : [MINND 2015])

3.1.1.2. Structuration par niveaux d'informations

Le projet COMMUNIC [COMMUNIC 2012] recommande de structurer les objets de l'infrastructure linéaire en niveau afin de faciliter la manipulation des informations. Le niveau zéro représente l'infrastructure linéaire dans son ensemble, les niveaux inférieurs sont créés au fur et à mesure que les objets créés décrivent des détails de plus en plus petits. Pour cela, il est proposé deux principes de formulation :

- L'agrégation de tous les objets d'un niveau donné constitue l'ensemble du projet.
- Un objet de niveau n est l'agrégation physique des objets de niveau n+1 qui ont été créés en le découpant.

Le nombre de niveaux n'est pas défini dès le départ. En effet, la création des objets inférieurs est progressive, en fonction des différents besoins. Un exemple (proposition de structuration faite sur le projet de l'autoroute A28) est illustré par le *Tableau III-1* :

Niveau	Objets concernés du niveau précédent	Objets
0	Patrimoine ALIS	Projet A28 Autres projets du patrimoine
1	Projet A28	RN 138 (le projet) Entité RN 138 Surface du TN (Topo, parcellaire, occupation, etc.) Ruisseaux Ouvrages concédés, réseaux Voiries existantes (giratoires, etc.)
2	RN 138	Ouvrages d'art Terrassements Chaussées Réseaux de drainage Aménagements paysager Equipements
3	Terrassements	Remblai courant Déblais courant Dépôt Emprunt
4	Remblai courant	Corps du remblai Arase Drainante
5	Corps du remblai	Des couches élémentaires

Tableau III-1 : Exemple d'arborescence d'un projet d'autoroute (Source : [COMMUNIC 2012])

- Niveau 0 : Ensemble de l'ouvrage à construire pour réaliser le projet de l'autoroute A28.
- Niveau 1 : Représentation des objets assurant une fonction ou un service attendu. La « RN 138 » par exemple pour maintenir la circulation automobile sur la RN 138.
- Niveau 2 : Représentation des objets qui font appel à une nature des travaux, à un métier du secteur. Pour le rétablissement de la RN 138, l'exemple de « Terrassements » pour les travaux et entreprises de terrassements.
- Niveau 3 : Représentation d'objets ouvrages élémentaires qui composent une même nature de travaux ou de métiers. Pour les terrassements de la RN 138, l'exemple pris est les travaux de « Remblai courant ».
- Niveau 4 : Représentation des objets qui font appel à des dispositions constructives différentes. Pour un remblai de terrassements de la RN 138, nous pouvons avoir la mise en œuvre courante du corps du remblai.
- Niveau 5 : Représentation des objets qui font appel à des spécifications de mise en œuvre, d'exécution. Pour le corps d'un remblai, des terrassements de la RN138, une couche élémentaire par exemple pour décrire la nature réelle des matériaux et spécifications de mise en œuvre associées.

Contrairement à la décomposition longitudinale et transversale assimilable à la phase de conception, cette décomposition pourrait être utilisée pour supporter la phase de travaux.

3.1.1.3. *Gestion des vues*

[Botton 2013] définit la visualisation comme une activité cognitive soutenue par des reproductions visuelles externes à partir desquelles les personnes construisent une représentation mentale du monde. La gestion des vues est une notion qu'on retrouve dans le PLM et dans le BIM. Une vue est une méthode de représentation qui a pour but de faciliter la compréhension de l'utilisateur [Abdelhak 2013]. Une vue métier est donc une représentation qui permet à un professionnel de mieux appréhender un système en fonction de son métier et de ses activités quotidiennes. Elle permet d'organiser les informations d'un même produit dans le but de fournir un accès spécifique aux informations du produit, qui correspondent aux différents process métiers. La collaboration des différents acteurs autour de la donnée centrale est primordiale pour la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Les besoins de ces acteurs diffèrent, car il s'agit de différents corps de métiers, ou alors des intervenants à différentes phases du projet. Malgré la complétude d'informations du niveau 0 ou alors de l'objet de tête de l'arborescence, une seule compilation de données n'est pas suffisante pour satisfaire tous les besoins. Différentes organisations des informations du produit sont nécessaires pour lier les besoins utilisateurs et les besoins métiers. Les vues sont utilisées afin de répondre aux besoins métiers pour différentes vues spécifiques de l'information produit.

L'arborescence de l'infrastructure linéaire doit ainsi permettre d'extraire différentes vues spécifiques (Figure III-4). [Duigou 2010] rappelle qu'il est possible de décomposer les vues en trois catégories : une vue fonctionnelle, une vue structurelle et une vue fabrication. Chaque item de la structure produit est accessible depuis plusieurs vues de la BOM : EBOM, MBOM, etc. Par exemple, un item peut appartenir en même temps à une fonction contractuelle, à une fonction de design, à un assemblage (DMU) ou à une tâche de maintenance.

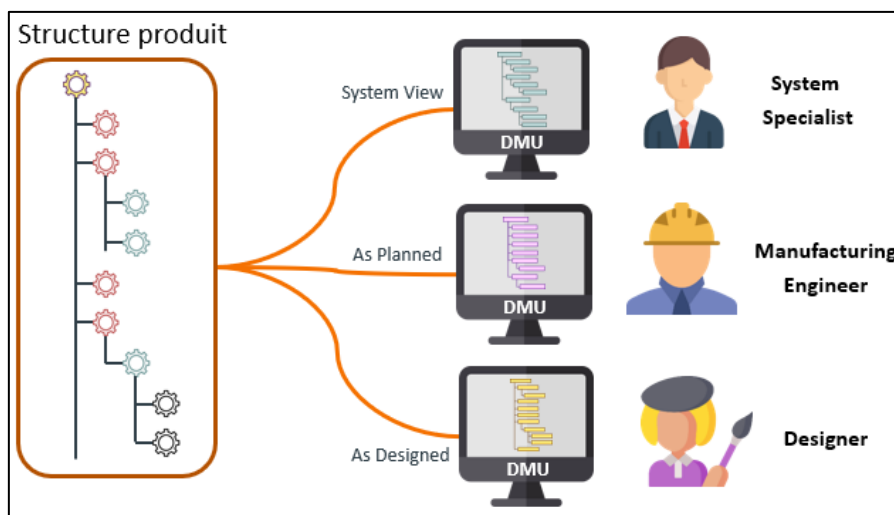


Figure III-4 : Extraction de plusieurs vues de la structure produit

La gestion des vues vient en réponse d'un besoin de traçabilité des exigences et propagation des modifications. Si le client demande une modification du produit (exigence) alors la traçabilité permet d'identifier quelles sont les parties du produit qu'il faut alors modifier. Les liens entre les vues représentent la traçabilité de bout en bout. Un autre moyen de gérer la traçabilité des données est la gestion des configurations. Elle consiste à gérer la description technique d'un système, ainsi que l'ensemble des modifications apportées au cours de l'évolution d'un système, assurant ainsi la cohérence entre les différents composants. La maîtrise de la configuration passe par l'identification formelle du contenu de la configuration de référence, par l'acceptation de son éventuelle évolution, et par le changement (volonté d'optimiser les performances, les coûts, les délais, etc.) dans la configuration de référence.

3.1.2. Positionner les acteurs et leurs besoins

3.1.2.1. Catégories d'acteurs

Les acteurs sont des personnes, ou groupes de personnes qui ont un rôle dans la gestion du cycle de vie de l'infrastructure linéaire. En fonction de l'accès au système ou à l'outil de gestion du cycle de vie de l'infrastructure linéaire, le projet COMMUNIC propose de distinguer les acteurs en trois catégories : les acteurs directs, les acteurs indirects et les acteurs influents.

La classification des acteurs faite au point [1.2.1](#) concerne les acteurs directs (concepteurs, constructeurs, exploitants, et MOA) , c'est-à-dire ceux qui ont une responsabilité directe dans la conception, la construction et l'exploitation de l'infrastructure. En créant une quantité importante d'informations, ils enrichissent le système de gestion de cycle de vie. L'échange d'informations est incontournable entre eux. Cette collaboration doit être assurée par le système, et aura un rôle stratégique en termes de coûts et de délais. Pour cela, ces acteurs doivent avoir un accès direct au système de gestion.

Les acteurs indirects quant à eux, sont ceux qui n'interviennent pas directement sur le système mais doivent passer par les acteurs directs, pour qui ils interviennent. Ce sont des bailleurs de fonds, consultants, financeurs, fournisseurs (données des concepteurs, matériaux), prestataires du MOA (contrôles extérieurs, CSPS, conseils), sous-traitants de concepteurs (et BE sous-traitants). La délimitation des responsabilités entre les acteurs directs et indirects est floue. En fonction du volume d'informations, de la nécessité à faire circuler plus rapidement les informations, ces acteurs indirects pourraient avoir des droits plus larges sur le système de gestion.

Enfin les acteurs influents, qui sont les différentes parties prenantes du système. Ils doivent être au courant de l'avancée du projet afin de prendre ou d'influencer des décisions impactant l'infrastructure linéaire et son environnement. On peut citer les acteurs économiques, administrations, associations, collectivités, éditeurs de logiciels, fédérations professionnelles, riverains.

3.1.2.2. Usages et attentes vis-à-vis de l'outil de gestion

Les acteurs directs se répartissent autour du système, pour lequel ils ont des attentes particulières. Non seulement le système à mettre en place doit leur permettre d'exécuter les processus métiers mais doit également apporter de la valeur sur leurs activités. Pour la MOA, il peut s'agir d'optimiser les activités, de faciliter les approbations et les revues projets par exemple. Le système devra permettre entre autres aux concepteurs de mieux structurer leurs données, de faciliter les simulations, de maîtriser les interfaces. Quant aux constructeurs, les attentes sont de l'ordre de l'optimisation des tâches de chantier, de la maîtrise de risque et de l'accès aux modifications. Enfin pour les exploitants, le système doit leur permettre de prendre part à la conception de l'infrastructure linéaire et aux revues d'approbations de modification. Il est également question pour eux de tracer la vie de l'ouvrage, gérer les modifications en phase d'exploitation et enfin d'optimiser les aménagements futurs.

3.2. La notion de cycle de vie

Le cycle de vie est une notion qui est déjà bien intégrée dans le monde industriel. L'existence de plusieurs produits industriels implique une pluralité de cycle de vie. Plus généralement, un cycle de vie représente les étapes consécutives par lesquelles passe un produit ou un objet. La définition d'un cycle de vie est fonction du produit et de ses utilisations actuelles

et futures. Avant de définir les exigences et besoins d'une infrastructure linéaire au cours de son cycle de vie, nous allons définir au préalable la notion de cycle de vie d'une manière globale.

3.2.1. Cycle de vie d'un produit

Comme le rappelle [Pinel 2013], l'entreprise manufacturière considère les états de maturité de ses produits selon deux points de vue : un point de vue technique et un point de vue commercial.

3.2.1.1. La maturité commerciale : n'existe pas pour une infrastructure linéaire

La maturité commerciale est identifiée au travers des ventes des produits physiques. Le volume des ventes du produit est en croissance, en maturité, en déclin [Kotler et Armstrong 2010]. Elle fait référence à une approche marketing du produit, c'est-à-dire l'évolution du produit dans le marché. Comme le décrit la *Figure III-5*, la maturité commerciale décrit l'évolution du volume des ventes ou du profit dans le temps. Il comprend quatre phases séquentielles : l'introduction du produit sur le marché ou lancement, la croissance des ventes, la phase de maturité du marché puis le déclin. Ce concept est à adapter en fonction du type de produits, et de l'échelle de temps (qui dépend de la longueur du cycle de vie du produit).

Toutefois, cette maturité concerne uniquement les produits qui sont fabriqués en série, ayant un objectif de rentabilité financière. Elle ne concerne donc pas les infrastructures linéaires qui ne sont pas construites en série, et pour qui la rentabilité financière n'est pas toujours prise en compte, du fait de leur caractère public. Aussi, au début du cycle de vie commercial le produit existe déjà physiquement et est déjà mis en vente et commence à être employé par les utilisateurs finaux. Contrairement au cycle de vie conceptuel, où le produit n'existe pas au départ mais il est créé et enrichi dans le temps.

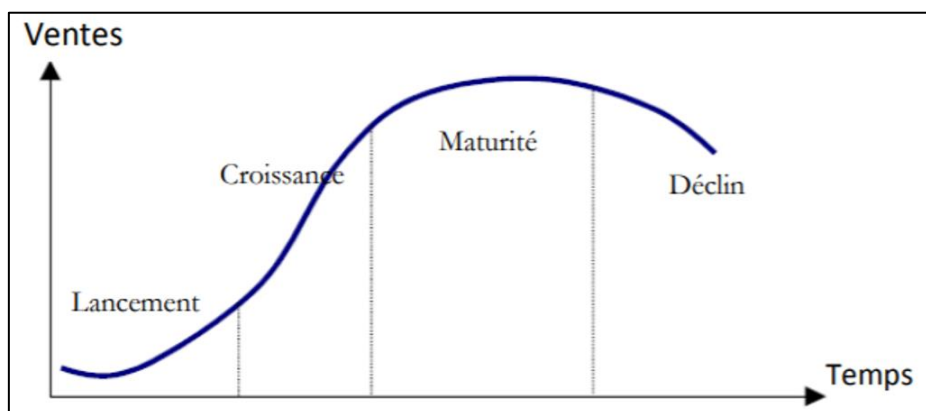


Figure III-5 : Phases du cycle de vie produit au marché (Source : [Onkvisit et Shaw 1989])

3.2.1.2. La maturité technique ou conceptuelle.

Le cycle de vie ici est vu comme une approche conceptuelle, qui désigne l'ensemble de toutes les phases reconnues comme étapes plus ou moins indépendantes poursuivies par le produit depuis l'idée de sa création (sa naissance) jusqu'à son retrait ou son démantèlement (sa mort), telles que : la conceptualisation, la conception, la planification des gammes de fabrication, la production, la distribution, l'utilisation, le démantèlement et parfois le recyclage [Verschoor et Reijnders 1999]. Cette maturité technique est identifiée au travers du produit théorique et du produit physique. Le produit est défini, réalisé, exploité et retiré [Gzara 2000].

Pour répartir les activités dans ce type de cycle de vie, plusieurs modèles existent. [Terzi 2005] cite le modèle STEP (STandard for the Exchange of Product) pour définir un modèle de référence pour les phases de cycles de vie des produits (Figure III-6) ; même si plusieurs entreprises définissent leur propre modèle de référence.

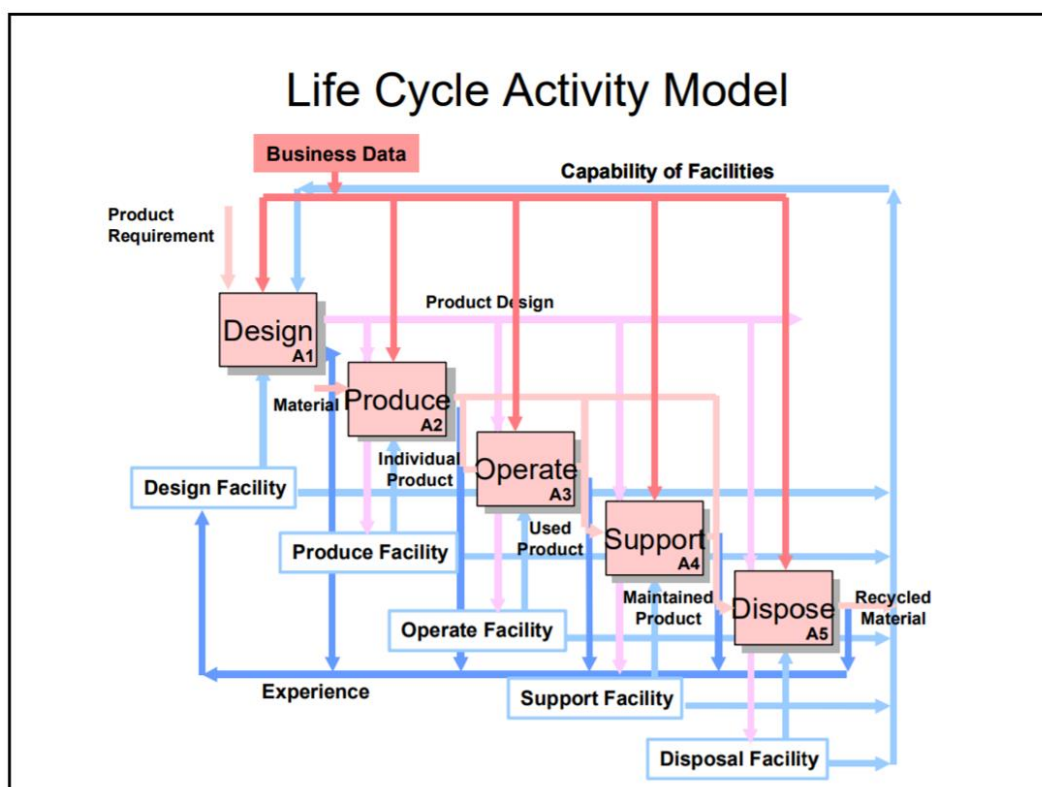


Figure III-6 : Modèle de référence STEP de cycle de vie du produit (Source : [ISO STEP 1995])

Un autre type de cycle de vie est donné par le modèle GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology). [GERAM 1999] décrit les différentes phases du cycle de vie allant de l'idée jusqu'à la fin de vie (Figure III-7). GERAM est défini à travers une

approche pragmatique fournissant un cadre généralisé pour décrire les composants nécessaires dans tous les types de processus d'ingénierie d'entreprise. Le modèle comprend les étapes suivantes :

- L'identification : Il s'agit d'identifier le contenu de l'entité particulière considérée en termes de ses limites et de sa relation avec ses environnements interne et externe ;
- La conceptualisation (concept) : désigne l'ensemble des activités nécessaires à la conceptualisation de l'idée à l'origine du produit, sa définition, ses objectifs stratégiques... ;
- L'analyse des besoins (requirements): Il s'agit des activités nécessaires pour élaborer des descriptions des exigences opérationnelles de l'entité, ses processus pertinents et la collecte de tous leurs besoins fonctionnels, comportementaux, informationnels et capacitaires. ;
- La conception (design) : concerne l'ensemble des activités qui s'intéressent à la conception du produit satisfaisant le mieux les besoins exprimés à la phase précédente. Elle comprend la conception préliminaire et la conception détaillée ;
- L'implémentation : consiste en la réalisation des solutions retenues à l'issue de la conception ;
- La mise en service (operation) : concerne les activités utiles à la production et la commercialisation, le service client ainsi que toutes les tâches nécessaires au suivi, au contrôle et à l'évaluation de l'opération
- Le démantèlement (decommission) : le retrait des produits en fin de vie.

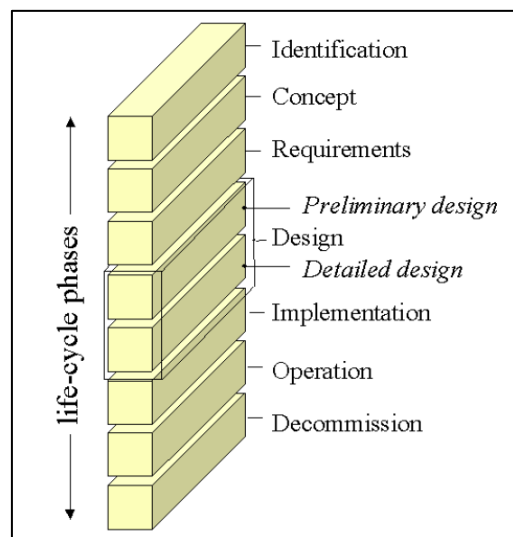


Figure III-7 : Modèle de référence du GERAM pour le cycle de vie produit (Source : [GERAM 1999])

Plusieurs autres travaux scientifiques optent pour une répartition pour un cycle de vie triphasé : début de vie, milieu de vie et fin de vie. Comme évoqué au point 1.1.3, [Kiritzis et al. 2003] les appellent respectivement Beginning-Of-Life (BOL), Middle-Of-Life (MOL) et End-Of-Life (EOL).

Hormis le cycle de vie triphasé, [Terzi 2005] propose un cycle de vie se composant de quatre phases : phase de développement du produit (conception du produit et de son process), phase de production du produit (comprend les activités de production et de distribution), phase d'utilisation du produit (les activités d'utilisation du produit, de consommation et de maintenance) et phase de rejet du produit (le produit est détruit, désassemblé ou recyclé). Le Tableau III-2 établit une correspondance entre les modèles et les cycles de vie phasés.

Cycle de vie selon [Terzi et al. 2010]		Cycle de vie selon [Terzi 2005]		Modèle : [ISO STEP 1995]	Modèle [GERAM 1999]
Phases	Activités	Phases	Activités	Activités	Activités
Début de vie	Conception	Développement	Conception produit et process	Design	Recherche / Conceptualisation / Analyse du besoin / Conception
	Fabrication/Production	Production	Production	Produce	Implémentation
Milieu de vie	Distribution		Utilisation	Utilisation	Operate
	Utilisation	Utilisation	Maintenance	Support	
	Maintenance		Rejet	Destruction/Désassemblage/Retrait	Dispose

Tableau III-2 : Correspondances entre les différents cycles de vie

Toutes ces étapes ne sont pas forcément applicables aux infrastructures linéaires. La modélisation et le découpage du cycle de vie d'un "produit" est intimement lié à sa nature. Il devient ainsi nécessaire de décrire le cycle de vie d'une infrastructure linéaire.

3.3. Le cycle de vie d'un projet d'infrastructure linéaire

Plusieurs travaux scientifiques classent le cycle de vie d'un ouvrage en plusieurs phases. Du fait de ses similitudes avec des produits manufacturiers et les bâtiments, nous définissons le cycle de vie d'une infrastructure linéaire en trois phases : « conception », « construction », et « exploitation et maintenance » (Figure III-8).

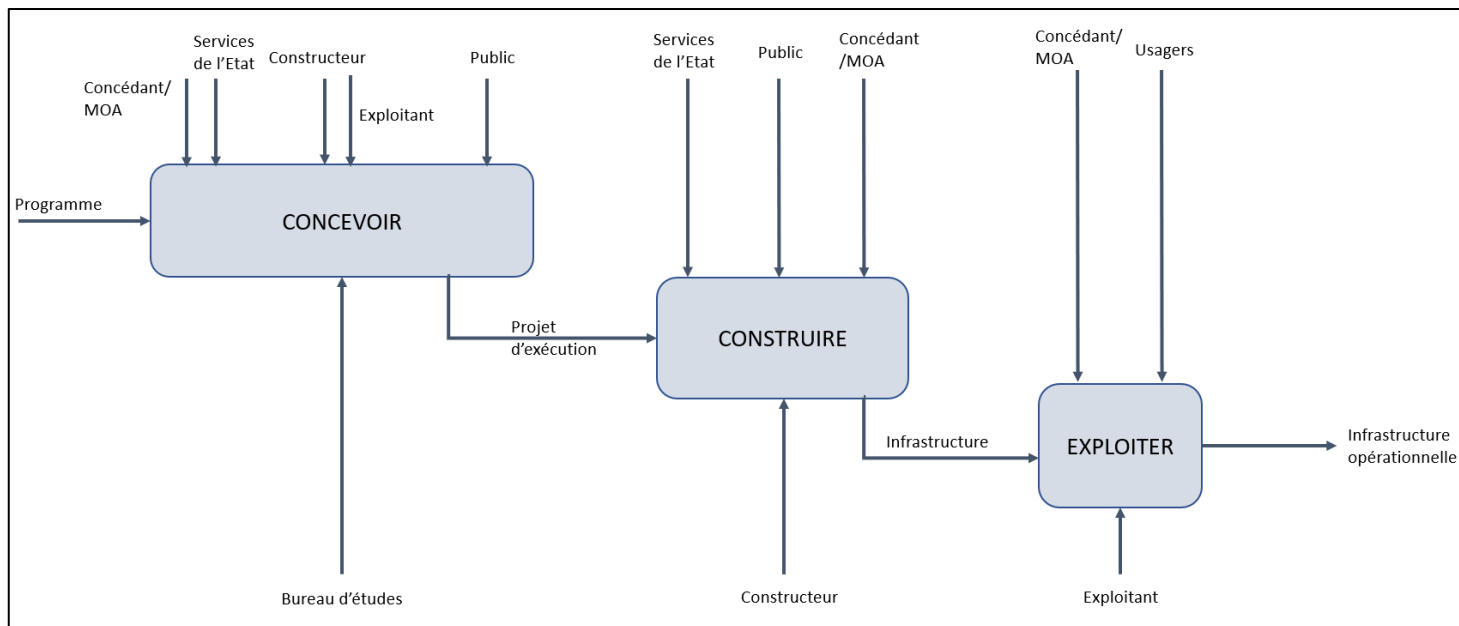


Figure III-8 : Macro-processus du cycle de vie d'une infrastructure linéaire (Source : [COMMUNIC 2012])

3.3.1. Importance de la phase de conception

Comme évoqué au point [1.2.3](#), la phase de conception peut être subdivisée en deux phases : études préalables et conception détaillée de l'ouvrage.

La phase de conception est celle qui entame le cycle de vie. Elle révèle une importance critique pour la suite du projet de construction. Le nombre croissant d'acteurs dans un projet de construction nécessite un travail en mode collaboratif. De plus en plus d'acteurs doivent être associés à la conception, car le cycle de vie complet de l'infrastructure est pris en compte dans la conception. L'intégration en amont des acteurs de la construction ainsi que ceux de l'exploitation/maintenance va permettre aux concepteurs d'intégrer dès la conception des exigences de construction et d'exploitation. On obtient une meilleure compréhension du projet par tous les acteurs. A l'instar d'un produit manufacturé qui nécessite des outils PLM interopérables pour la conception intégrée et le travail collaboratif [VAN WIJK et al. 2009], l'ingénierie collaborative autour d'une infrastructure linéaire doit reposer sur un système interopérable avec plusieurs outils métiers. Aussi, concentrer les acteurs projet dès le début du projet limitera les erreurs de conception, les ressaisies de données et d'information et réduira les modifications tardives. Les modifications tardives impactent négativement le coût global du projet. Plus tardivement sont faites les modifications, plus chères seront-elles.

Par ses objectifs de réduction des délais et de travailler de manière plus collaborative dès le début du projet, l'ingénierie concourante nécessite de [COMMUNIC 2012] :

- Mener des conceptions en parallèle et non plus séquentielles.
- Revoir les processus de production et de validation des études.
- Adapter les logiciels de conception pour les rendre interopérables avec la MN.

Aussi, si le coût total est moins concentré lors de la phase de conception, c'est dans cette phase qu'une plus grande optimisation des coûts est envisageable, d'où l'intérêt de disposer d'une meilleure conception afin d'améliorer la gestion en construction, exploitation et maintenance. Néanmoins, comme le rappelle [OPIIEC 2016], cette vision du coût global ne converge pas avec la vision budgétaire. Les études étant les premières dépenses, et il est toujours en effet délicat de payer plus d'entrée pour un hypothétique gain à venir. Par exemple, si l'on augmente les coûts de conception de 20% et que l'on espère économiser 30% sur la phase de construction, le gain global n'est que de 8%.

3.3.2. Continuité avec la phase de construction

Après des études et plans d'exécution, l'architecte prépare la contractualisation avec des entreprises de travaux. Sachant que l'optimisation de la réalisation est entamée dès la conception, les enjeux ici sont d'optimiser les travaux afin d'anticiper les aléas et les risques. S'en suivent préparation de chantier, construction et livraison et réception de l'ouvrage (Assistance aux Opérations de Réception AOR). Dans cette dernière étape, est rédigé le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE). C'est le document contractuel qui retrace le parcours du projet depuis les études géotechniques, et propose des indications pour l'exploitation et la maintenance.

Il existe plusieurs schémas contractuels concernant le chantier.

- Schéma traditionnel : La phase de conception est faite sans constructeur parce qu'il n'est pas encore désigné. Il s'agit donc d'un schéma séquentiel et non collaboratif.
- Schéma collaboratif (Groupement concepteurs/constructeurs (Design-Build, PPP ou concession privée)): Il s'agit du schéma à suivre pour qu'une ingénierie concurrente soit possible. C'est ce schéma qui est considéré dans ce manuscrit. Comme vu au point précédent, le constructeur peut influencer la conception pour optimiser la construction.

3.3.3. Criticité de la phase d'exploitation et maintenance.

L'exploitation d'une infrastructure linéaire correspond à la mise à disposition du public, et son contrôle par un opérateur, public ou privé. Cet opérateur est également responsable de la politique de maintien (activités et services) de l'infrastructure en conditions opérationnelles : c'est la maintenance. Les acteurs d'exploitation et maintenance peuvent conclure des contrats de concessions avec les propriétaires. En fixant une redevance, ces contrats autorisent ces opérateurs à se rémunérer directement auprès de l'utilisateur de l'infrastructure. Les opérateurs s'engagent en contrepartie à garder des niveaux de performance et de disponibilités de l'ouvrage tout au long de la durée du contrat. Les économistes de la construction estiment que les coûts afférents à cette phase peuvent atteindre jusqu'à 75 % du coût global de la vie de l'infrastructure. Phase la plus longue, elle revêt ainsi un enjeu financier pour ces opérateurs. Leur rentabilité peut être impactée par le taux de disponibilité de l'infrastructure.

Pour assurer un fort taux de disponibilité, les opérateurs ont besoin d'accéder aux données de conception et de recueillir des informations qui renseignent l'état de l'ouvrage. Si la définition d'une infrastructure ne dévie pas ou évolue peu pendant cette phase, ces informations capturées sont de nature abondante. Cette masse d'informations, décorrélée de la définition, dénote l'évolution des usages de l'infrastructure, et devient avec le temps difficilement exploitable. Il revient donc aux opérateurs d'exploitation et maintenance de les gérer qualitativement, afin d'assurer leur continuité et une bonne gestion de connaissances. Aussi, en cas d'incident, il est important de pouvoir remonter à l'exigence (conception), à la donnée en erreur pour pouvoir la tracer. C'est pourquoi ces opérateurs doivent être associées au projet dès la phase de conception. Enfin, la phase O&M peut se terminer avec la destruction ou la déconstruction de l'ouvrage.

3.4. Cycle de vie de l'information sur un projet d'infrastructure linéaire

L'information reste primordiale au cours d'un projet industriel. La collaboration autour de cette information est un enjeu majeur pour le secteur des infrastructures linéaires. A l'ère du Product Data Management (PDM) ou gestion des données techniques, l'intérêt est de gérer et rendre accessible toutes les informations et processus relatifs à l'infrastructure linéaire. Le système à mettre en place doit être capable de porter et visualiser toutes les informations du projet. Pour une meilleure collaboration et une ingénierie concourante, le système doit être capable de communiquer avec chaque logiciel métier. Cette collaboration correspond au moins au BIM de niveau 2. Ceci pousse à mettre en place un format d'échange neutre. Plusieurs travaux sont en cours pour la définition du format IFC pour les infrastructures linéaires : IFC Bridge, IFC Rail, IFC Road, IFC Tunnel. A titre de rappel, la standardisation du format d'échange n'est pas suffisante pour permettre d'échanger les informations automatiquement. Il faut également que le modèle des données soit standardisé et partagé par les logiciels métier tant pour leurs entrants que pour leurs livrables. De ce fait, il devient indispensable de structurer l'ensemble des données manipulées par chaque domaine métier suivant une logique identique pour tous, ce qui en permettra alors le transfert continu de l'un à l'autre [Gobin 2001]. S'il existe plusieurs travaux proposant un cadre de modélisation d'informations pour les bâtiments [Zhu et al. 2015], ceux relatifs aux infrastructures linéaires sont beaucoup moins nombreux. Il faut prendre en compte l'évolution de l'information en fonction de la phase projet. L'évolution temporelle d'un projet de construction correspond à l'augmentation de la quantité d'informations disponibles et leur enrichissement et précision. Les décisions prises lors des phases amont de la construction ont un impact sur la suite du projet, car l'information qui y est disponible est la moins précise.

Pour qu'une information puisse vivre et évoluer au cours du cycle de vie d'une infrastructure linéaire, il faut assurer une certaine continuité numérique. Une exigence définie en phase

de conception doit être retrouvée en phase d'exploitation et maintenance. Pareillement, une information modifiée ou modifiable en exploitation peut trouver sa source en phase de conception. Tout comme un produit manufacturier, les infrastructures linéaires peuvent évoluer. La gestion des modifications est un processus métier qui permet de décider et d'assurer la mise en œuvre d'une modification sur un produit. Les modifications sont de plusieurs natures : changement d'exigence (le client change d'avis), évolutions des structures existantes, modifications à apporter à la suite des problèmes (bugs) qu'il faut corriger sur l'infrastructure. Le système à mettre en place doit ainsi permettre de gérer les demandes de modification en intégrant les raisons de la demande de modification (évolution, correction, changement), l'analyse d'impact et la priorisation des solutions possibles, les conditions d'applications de la modification (effectivité : immédiate, à date, sur stock ...), les workflows d'approbation et de validation.

On peut distinguer ce qu'on appelle les modifications non critiques (Non Critical Change) de celles critiques (Critical Change).

- Modification non critique : qui a un impact sur le produit final limité car concerne un produit qui n'est pas encore lancé en fabrication. Se gère via la collaboration à l'aide des fonctionnalités PLM (Check-in / out / versionning / tasks ...)
- Modification critique : qui concerne des produits déjà lancées en production et pour lesquels toute modification a un coût autre celui du projet d'étude. Se gère en s'appliquant des règles de gestion et de pilotage des modifications pour garantir une traçabilité des évolutions du produit.

Outre le cycle de vie de l'objet qui peut être représenté en *Figure III-9*, les objets évoluent aussi à travers des révisions. Tous les objets ayant des correspondances dans plusieurs vues, il y a une nécessité de pouvoir établir des boucles retour d'une donnée à travers les différentes vues du produit.

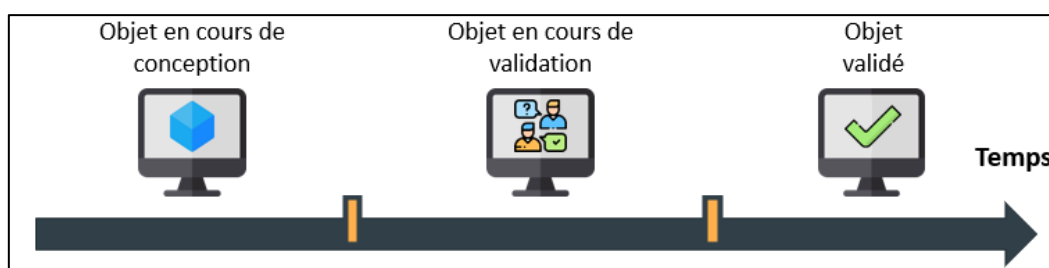


Figure III-9 : Cycle de vie d'un objet

3.5. Besoins de systèmes complémentaires GMAO, SIG, IoT.

Le système à définir se base sur des fonctionnalités PLM et BIM. Malheureusement il s'avère que ces deux notions ne suffisent pas à couvrir toutes les données du cycle de vie

d'une infrastructure linéaire. En plus de ces systèmes, on peut trouver de la valeur ajoutée dans des SIG (Systèmes d'Information Géographique), via des objets connectés, ou encore dans des outils de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur).

3.5.1. Les Systèmes d'Information Géographique

Les Systèmes d'Informations Géographiques sont essentiellement des logiciels de stockage et de restitution de données qui permettent de gérer des réseaux linéaires (voies ferrées, canaux, routes, chemin...) ou des informations de type surfacique (cadastre, parcs...). Dès les années 90, certains Conseil Généraux se sont dotés d'un SIG. Aujourd'hui, près de la moitié des départements français disposent d'un tel système, et l'utilisent pour gérer de nombreuses thématiques mettant en œuvre des informations géolocalisées. Les SIG n'ont pas été développés, initialement, pour gérer les routes, même si cette application est apparue assez rapidement. Les fournisseurs de SIG en France poussent en avant ce type d'application et présentent le SIG comme une alternative à la base de données routière. On peut toutefois affirmer qu'il n'y a nulle part un recul suffisant pour confirmer cette assertion. Certains départements qui étaient parmi les premiers engagés dans cette voie reviennent vers une cohabitation des deux types de systèmes.

Dans un SIG, toutes les données sont localisées dans un référentiel [X, Y] voire [X, Y, Z]. Ainsi, tout objet est repéré par sa localisation précise à la surface de la Terre, et ceci sans rapport établi avec les réseaux routiers. A l'extrême, on peut affirmer que tout objet peut être localisé et donc introduit et géré dans un SIG. A l'inverse d'une base de données routière dans laquelle les données relevées en continu sur une section de route sont directement identifiées comme étant contiguës sur le même objet, et peuvent faire plus aisément l'objet de traitement exploitant cette contiguïté, le SIG n'exploite qu'indirectement cette information, ce qui pénalise ses analyses. Par ailleurs, le SIG étant destiné à de nombreuses applications, il comporte en général beaucoup de couches, beaucoup de données, ce qui alourdi autant sa gestion (en tant que système informatique) que ses calculs. En revanche, dans un SIG, les données routières forment une couche d'informations, comme il en existe d'autres (relief, hydrologie, zones d'urbanisation, parcelles, réseau d'établissements...). Il est donc possible de modéliser des interactions entre les routes et les autres éléments d'environnement ou de contexte. En outre, les SIG disposent de fonctions de croisement géographique qui facilitent et accélèrent ce type d'exploitation.

Parmi les administrations françaises disposant d'une compétence routière, les SIG sont principalement utilisés par les Conseil Généraux, ainsi que par la Direction des Services (DS). Outre les activités de gestion de bâtiments publics, de cadastre, de transport fluviaux ou ferroviaires... les SIG aident à mettre en œuvre la définition des circuits de ramassage, scolaire ou autres, des autorisations de voirie, des plans d'accès, etc. En d'autres termes, c'est un

outil qui peut être très utile dans la définition et l'actualisation de plans de transport, notamment routier. Pour cette raison, dans notre analyse, c'est donc aux besoins des propriétaires que les SIG répondent en priorité.

3.5.2. Internet of Things, les objets connectés

L'Internet des Objets représente l'extension d'Internet à des choses ou objets connectés. Un objet connecté est tout objet identifiable et capable de transmettre à un système de traitement d'information des informations sur son environnement. C'est un objet muni de capteurs qui communique à distance avec un hub, par exemple un smartphone, capable de traiter les données qui lui sont envoyées. L'aspect essentiel d'un objet connecté est la faculté de transmettre les données captées à un système informatique capable de les traiter et de les interpréter afin d'en dégager une information utile pour l'utilisateur/le destinataire. Un capteur est un Dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une intensité, etc. Il constitue une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition des données en temps réel. L'Internet des objets représente l'écosystème des objets connectés. C'est une extension de l'Internet par la création d'un réseau omniprésent et auto-organisé d'objets physiques connectés, identifiables et adressables permettant le développement d'applications au sein de secteurs verticaux clés et entre ces secteurs par le biais de puces intégrées (IUT).

Alors qu'Internet ne se prolonge habituellement pas au-delà du monde électronique, l'Internet des objets connectés représente les échanges de données provenant de dispositifs présents dans le monde réel vers le réseau Internet. L'Internet des objets est « *un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et sans fil, d'identifier et de communiquer numériquement avec des objets physiques afin de pouvoir mesurer et échanger des données entre les mondes physiques et virtuels* ». Considéré comme la troisième évolution de l'Internet, baptisée Web 3.0 (parfois perçu comme la généralisation du Web des objets mais aussi comme celle du Web sémantique) qui fait suite à l'ère du Web social, l'Internet des objets revêt un caractère universel pour désigner des objets connectés aux usages variés, dans tous les domaines, en particulier ceux de la e-santé, de la domotique ou du Quantified-Self (mesure, analyse et partage de données personnelles). L'Internet des objets est en partie responsable d'un accroissement exponentiel du volume de Données générées sur le réseau, à l'origine du Big Data.

3.5.3. GMAO

La GMAO ou Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur désigne toute méthode de gestion des opérations et des informations de maintenance d'une entreprise, d'une collectivité territoriale ou d'une administration à l'aide d'un outil informatique, afin de l'aider dans ses activités. Un service de maintenance, selon la définition de l'AFNOR, cherche à maintenir

ou à rétablir un bien (équipement) ou une infrastructure dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. On pourrait ajouter une dimension de performance : « d'une manière efficace et économique ».

Si l'on veut se limiter à l'industrie du bâtiment/Travaux Publics, la GMAO (L'équivalent en anglais est CMMS, abréviation de Computerized Maintenance Management System) permet aux investisseurs en immobilier, propriétaires, gestionnaires de patrimoine ainsi qu'aux prestataires de services, d'exploiter et d'entretenir les infrastructures louées dont ils assument la maintenance. La GMAO vise en premier lieu à assister les services de maintenance dans leurs missions. Ce logiciel les aide à planifier, enregistrer et contrôler tous les types de travaux de maintenance, que ceux-ci soient traités en interne ou sous-traités.

Si l'une des premières fonctions d'une GMAO est d'apporter une assistance automatisée à la gestion de la maintenance dans une entité, la GMAO peut aussi être utile dans d'autres secteurs de l'entreprise ou l'administration, comme la production ou l'exploitation (afin de fournir des informations sur l'état de l'infrastructure et des équipements), ainsi que la direction financière ou générale de l'entreprise, en fournissant des indicateurs facilitant les prises de décisions en matière de renouvellement de parc, par exemple. Ainsi, les fonctions les plus courantes de ces logiciels sont :

- Gestion des équipements : inventaire des équipements, localisation, gestion d'information dédiée par type d'équipement/infrastructures (production, bâtiments, véhicules, réseaux, ordinateurs, etc.). Les biens d'équipement, ou biens de production, représentent l'ensemble des biens acquis par les unités résidentes (comprenez unités de production nationales) pour être utilisés pendant au moins un an dans le processus de production. Ce sont les outils de travail, par exemple des machines, des bâtiments, dont une société se dote.
- Gestion de la maintenance courante : corrective (avec OT : ordre de travaux, ou BT : bon de travaux, ou ODM : ordre de maintenance), préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle), etc. Ce module comporte des fonctionnalités ouvertes à des utilisateurs au-delà du service de maintenance, comme une gestion des demandes d'intervention (DI), permettant à toute personne autorisée de l'entreprise de signaler une anomalie devant être prise en considération par la maintenance.
- Planification des interventions/ travaux de GER/ inspections périodiques avec 3 horizons : long terme, Plan à 5 ans glissants, Plan annuel glissant, avec date des interventions et montant des investissements correspondants
- Gestion de la mise en sécurité des installations pour les travaux de maintenance : consignation, centralisation, autorisation de sécurité, déconsignation, etc., pour permettre le verrouillage optimal d'une installation/ balisage optimal d'une infrastructure pendant des opérations de maintenance.

- Gestion des stocks : magasins, quantités minimum ou maximum de réapprovisionnement, listes de sélection (*pick-lists*), référencement et recherche, articles de rechange, catalogue fournisseurs, etc. C'est le cas du sel dont les stocks doivent être bien gérés en hiver pour assurer une viabilité routière en prévision ou à la suite chutes de neige.
- Gestion des achats : de pièces détachées ou de services (sous-traitance, forfait ou régie), cycle devis / demande d'achat / commande / réception & retour fournisseur, facturation, etc.
- Gestion du personnel et planning : activités, métiers, planning de charge, prévisionnel, pointage des heures, etc. Cette fonction est importante quand il s'agit du réseau routier. Il est crucial de pouvoir gérer les patrouilles, et répartir les patrouilleurs suivant des points stratégiques et à des périodes opportunes. Aussi, on peut noter qu'il est indispensable de pouvoir dépêcher à tout instant des agents de maintenance/réparation en cas d'incidents routiers.
- Gestion des coûts et budget : de main d'œuvre, de stocks, d'achat, de location de matériel, etc., préparation des budgets, suivi périodique, rapports d'écart, etc.
- Indicateurs clés de performance (*Key Performance Indicators, KPI*) : cockpit de pilotage ou tableau de bord pour tous les acteurs de la maintenance (requêtes de base).

3.6. Du cycle de vie, des process aux exigences du système de gestion

Les besoins fonctionnels sont ceux qui ont été identifiés par [COMMUNIC 2012]. Si la réponse à leur besoin se fait au travers d'une maquette numérique, notre système lui correspond à un Jumeau Numérique, qui inclut et contient une maquette numérique. Notre système doit ainsi être un outil de :

- **Travail collaboratif** : l'accessibilité à l'information doit être choisie par l'entreprise, tout en veillant à l'unicité du modèle, sur la nécessité d'un modèle de données unique et d'un format d'échange neutre pour créer, intégrer ou fusionner et gérer des modèles partiels. Il faudrait définir des protocoles préfigurant des standards. C'est pour satisfaire cet aspect collaboratif que se développe le standard IFC.
- **Structuration** : le système doit permettre de gérer les modèles de données à chacun selon ses rôles, chaque information doit avoir un propriétaire et le propriétaire est responsable de l'information partagée.

- **Visualisation ou Création et d'affichage 3D** : pour la création et l'intégration de modèles CAO, et la gestion des plans 2D associés au modèle 3D. On retrouve ce besoin dans les industries manufacturières et pour le bâtiment.
- **Aide à l'optimisation** : gérer l'évolution de l'information, le processus de validation pour piloter le niveau de qualité et le degré de fiabilité.
- **Archivage et de capitalisation** : le système de gestion doit permettre d'enregistrer les modifications qu'un jumeau numérique a le plus.

Le système doit également permettre de gérer de bout en bout la chaîne d'informations depuis le début du projet, et la maintenir jusqu'à la phase d'exploitation et maintenance, et ce sans discontinuité numérique.

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de constituer une démarche pour arriver à définir le cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Les phases du cycle de vie d'une infrastructure linéaire sont semblables à celles d'un bâtiment, mais leur durée est différente. La définition de sa structure ainsi que la collaboration et la répartition des différents acteurs autour d'un projet d'infrastructure linéaire permettent d'affiner les exigences de leur cycle de vie. Ces exigences viennent rappeler la nécessité d'assurer la continuité numérique des données tout au long du cycle de vie, ainsi que le besoin de tracer les informations produites en exploitation aux données de conception, afin d'améliorer les activités d'exploitation et maintenance.

Il en ressort que certains besoins de gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire peuvent être résolus par certaines fonctionnalités PLM ainsi que certaines fonctionnalités BIM. Les fonctionnalités PLM devraient résoudre les exigences relatives à la gestion du cycle de vie : gestion de nomenclature, travail collaboratif, traçabilité et capitalisation des données ... tandis que le BIM accompagnerait l'infrastructure avec des fonctionnalités relatives à la maquette numérique. Toutefois, certaines exigences ne sont en lien ni avec le BIM et le PLM, mais des systèmes annexes, intégrables, tels que IoT, SIG et GMAO. Il pourrait ainsi devenir intéressant de proposer un environnement qui met en commun toutes ces sources de données et d'informations : c'est l'objectif même du prochain chapitre. Il sera question d'adapter conjointement ces différents systèmes afin de mieux gérer le cycle de vie d'une infrastructure linéaire.

Quatrième Chapitre :

Adaptation des concepts et proposition de jumeau numérique

IV. Adaptation des concepts et proposition d'un modèle de jumeau numérique pour des infrastructures linéaires

Les chapitres précédents ont permis tour à tour de resituer le contexte industriel et économique dans laquelle se positionne cette thèse, de rappeler les avancées sur l'utilisation des notions BIM et PLM, ainsi que d'énumérer des éléments nécessaires pour la gestion du cycle de vie d'une infrastructure dite linéaire. Il s'est avéré dans ces chapitres, que prises seules, ou même conjointement, ces deux notions ne couvraient que partiellement les besoins d'une infrastructure linéaire dans sa phase d'usage.

Il sera question dans ce chapitre, d'aller au-delà du PLM et du BIM dans l'objectif d'adapter des concepts et de proposer un modèle de jumeau numérique pour des projets d'infrastructures linéaires. Cette disposition du jumeau numérique devrait faciliter la mise en place d'une politique de maintien en conditions opérationnelles d'une infrastructure.

Les fonctionnalités proposées par notre modèle se basent principalement sur celles du PLM et du BIM. D'autres notions seront évoquées, notamment GMAO, SIG, IoT, etc. qui nous mèneront à la définition d'un jumeau numérique. Nous allons par la suite définir un écosystème du jumeau numérique, et terminer par une nouvelle approche méthodologique pour la représentation numérique d'une infrastructure réelle.

4.1. Utilisation conjointe du BIM et PLM pour des infrastructures linéaires

Une des conclusions de l'état de l'art est la possible complémentarité entre BIM et PLM. Le BIM s'appuie sur le PLM pour optimiser la gestion numérique des projets BTP. Il se focalise sur les fonctions de visualisation, les calculs de propriétés, la vérification des interactions entre différents éléments. Il ne traite pas la gestion des documents ni le contrôle des états et des versions de ces derniers. Le PLM formalise les processus de validation, d'échange, de modification alors que le BIM est davantage une copie redondante qu'on essaye de maintenir. C'est dans cette optique que [Heikkila et al. 2011] affirment que la fonction du BIM est de produire des données et des informations numériques sur les produits (outils de création 3D) et les PLM traitent les informations numériques sur les produits. En ce qui concerne les fonctionnalités, le *Tableau IV-1* confronte les fonctionnalités principales de deux logiciels majeurs PLM et BIM. Il montre qu'elles peuvent se regrouper en trois grandes catégories : gestion de la nomenclature et de la diversité, gestion du design, et ingénierie collaborative.

Fonctionnalités PLM [PTC 2015]	Groupe de fonctionnalités	Fonctionnalités BIM [Autodesk 2020]
Gestion des modifications et des configurations	Gestion de la nomenclature et de la diversité	Gestion nomenclatures
Gestion complète des nomenclatures		
Visualisation intégrée	Gestion du design	Visualisation
Gestion de données multi-CAO		Conception générative
		Conception paramétrique
Gestion répartie des documents et items	Ingénierie collaborative	Travail collaboratif
Gestion des droits d'accès		Interopérabilité et IFC
Workflow		

Tableau IV-1 : Groupements communs de fonctionnalités entre le BIM et le PLM

Au troisième chapitre, il a été question du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Rappelons les besoins de gestion d'une infrastructure linéaire qui ont été notés dans ce chapitre au point [3.6](#) :

- Travail collaboratif
- Structuration
- Visualisation et création et d'affichage 3D
- Aide à l'optimisation
- Archivage et capitalisation
- Continuité numérique des données

Nous définissons ainsi, dans le *Tableau IV-2*, les caractéristiques que le système que nous proposons pourrait adopter à partir du BIM et du PLM. Il ressort clairement que certaines fonctionnalités (mais pas toutes) du PLM et du BIM sont très importantes pour ce système. Par conséquent, on peut dire que les infrastructures linéaires rendent l'association BIM/PLM intéressante.

Hormis les fonctionnalités propres aux IoT, aux SIG et à la GMAO, la combinaison du BIM et du PLM nous donnerait toute la majeure partie des fonctionnalités nécessaires pour couvrir les besoins d'un projet d'infrastructure linéaire. Le BIM doit devenir un PLM mature ou une partie intégrante de celui-ci. Pour permettre une telle combinaison, il est essentiel de savoir comment peut être gérée la structure produit d'une infrastructure linéaire. Pour ce faire, il est question de mettre en place une plateforme intégrant des fonctionnalités principales du BIM notamment la gestion de la maquette numérique ; ainsi que des fonctionnalités PLM. Cette façon de combiner les deux notions est enrichissante mais limitée car elle ne permet pas de positionner l'infrastructure dans son environnement géographique, ni de prendre en compte tous les ordres de fabrication ou modification qui peuvent être faits via un ERP ou une GMAO par exemple. Prendre en compte tous ces aspects mène à définir le jumeau numérique de l'infrastructure linéaire.

Fonctionnalités PLM	Besoins fonctionnels d'une infrastructure linéaire	Fonctionnalités BIM
Gestion répartie des documents et items	Travail collaboratif	Travail collaboratif
Gestion des droits d'accès		Interopérabilité et IFC
Workflow		
Gestion des modifications et des configurations	Structuration de données	Gestion nomenclatures
Gestion complète des nomenclatures		
Visualisation intégrée	Gestion du design	Visualisation
Gestion de données multi-CAO		Conception générative
		Conception paramétrique
Workflow	Aide à l'optimisation	Conception générative
		Conception paramétrique
Gestion des coffres-forts	Archivage et capitalisation	
Réutilisation des items		
Gestion de la maturité des données	Continuité numérique	
Gestion des modifications		

Tableau IV-2 : Un nouveau système basé à la fois sur BIM et PLM

4.2. Jumeau numérique d'une infrastructure linéaire

4.2.1. Définition de notre jumeau numérique d'infrastructure linéaire

Le jumeau numérique a été identifié comme élément de réponse aux difficultés de gestion rencontrées en phase d'exploitation d'une infrastructure linéaire. Aucune définition du jumeau numérique ne semble être assez consensuelle. On peut souligner le fait que l'accent est mis sur son aspect « haute-fidélité » ou « ultraréaliste » et qu'il serait une « contrepartie » ou une « représentation » du monde réel. Au-delà de ce fait, il faut rappeler que la définition et la représentation d'un jumeau numérique dépendent du contexte industriel dans lequel il est utilisé.

Le jumeau numérique peut être défini comme une représentation virtuelle des produits physiques actuels (ou à fabriquer), d'un processus de production ou d'une usine connectée. Notre proposition de jumeau numérique correspond à un ensemble d'usages impliquant l'utilisation de modèles numériques (MBSE, Modèles 3D, électronique, ...) facilitant les modifications en boucle courte d'une instance physique du produit et de ses services. Un élément indispensable pour parler de jumeau numérique est la connexion et synchronisation entre ce produit virtuel et un unique produit physique.

4.2.2. Utilisation d'un jumeau numérique unique

Il faut rappeler que l'une des fonctionnalités majeures du BIM est la possibilité de créer, gérer et échanger des informations tout au long de la vie d'un projet. À cette fin, l'utilisation d'un jumeau numérique, comme nous l'avons mentionné précédemment, est un atout. Ce jumeau numérique évoluera avec le temps. Compte tenu de l'existence de modèles numériques, la définition d'un digital twin peut se faire de deux manières : soit en conservant un seul digital model, soit en définissant un seul digital twin.

4.2.2.1. *Modèle numérique unique*

Il est essentiel de s'éloigner du schéma classique de définition qui met en place un modèle numérique à chaque phase du projet (modèle de conception, modèle de construction, modèle d'exploitation). Ainsi, la définition de la maquette numérique unique se fait dès les phases d'étude, en incluant tous les acteurs du cycle de vie, notamment en phase d'exploitation. Dès le départ, il est vital d'intégrer des processus de gestion en aval tels que le positionnement des objets connectés, la récupération et la descente d'informations, les processus de mise à jour de la maquette numérique et les exigences d'interopérabilité avec les logiciels conventionnels comme la GMAO. Cette considération de représentation du réel est incomplète parce qu'elle est limitée à une maquette numérique.

4.2.2.2. *Plusieurs modèles, un seul jumeau*

L'intérêt principal d'avoir une seule réflexion numérique en fin de projet est de pouvoir suivre les modifications ainsi que de retracer l'historique de construction de l'ouvrage. Dans ce cas, il est intéressant d'intégrer les différents modèles numériques de chaque phase à l'unique jumeau numérique. A partir de celui-ci, il devient donc possible d'extraire plusieurs types de modèles numériques. Ce jumeau numérique peut être géré selon les principes du PLM. Dans une approche en plusieurs phases, on veillera à établir une « continuité numérique » tout au long de la chaîne de valeur. En général, de nombreuses applications sont impliquées dans le développement de produits, la création et les processus de service. Cependant, certaines activités se déroulent exclusivement dans le monde « analogique » et ne sont pas prises en charge par les systèmes numériques.

4.3. Jumeau numérique unique

Parmi les définitions du jumeau numérique dans le monde industriel, celle de General Electric pourrait correspondre à notre système jumeau numérique. [General Electric Digital 2020] propose une décomposition du jumeau numérique en trois composants principaux (*Figure IV-1*) :

- Modèle de données : hiérarchie des systèmes, sous-systèmes et composants décrivant la structure du digital twin et ses caractéristiques. Il s'agit également du modèle de données de l'infrastructure représentée.
- Analyse informatique systématique des données : prédiction et description du comportement (actuel et futur) d'un actif ou processus via des modèles physiques et des modèles (intelligence artificielle et apprentissage automatique).
- Base de connaissances : sources de données qui alimentent les analyses, l'expertise, les données historiques et les meilleures pratiques de l'industrie.



Figure IV-1 : Les trois composantes d'un jumeau numérique d'après General Electric

Vu la multiplicité de systèmes de données déjà existants, il n'est pas obligatoire que le jumeau numérique résultant crée de nouvelles données. Notre jumeau numérique est une sorte de « data visualizer », c'est-à-dire une plateforme qui nous permet d'unifier et représenter graphiquement toutes les données liées à l'infrastructure concernée. Sa construction nécessite d'interconnecter divers systèmes d'informations avec au moins PLM, BIM & IoT mais pourrait également inclure ERP, GIS ainsi que les nouvelles technologies émergentes.

Une première option serait de définir depuis un existant un jumeau numérique, en faisant une acquisition par différents moyens du tel-que-construit, puis en effectuant une interconnexion permanente entre le jumeau numérique et l'infrastructure à l'aide des capteurs et différents objets connectés. Si cette option classique présente des avantages déjà connus d'un jumeau numérique, sa mise en place peut s'avérer financièrement et techniquement difficile. En plus des efforts de rétroconception déjà fournis pour l'acquisition de l'existant, positionner des objets connectés sur une infrastructure nécessiterait sa réingénierie. Des études supplémentaires devront être faites sur le type d'objets connectés, leur fonction, leur position sur l'infrastructure, la communication avec des objets connectés existants, ainsi que la remontée et le traitement de l'information. Aussi, contrairement aux produits PLM qui sont fabriqués en série, les infrastructures linéaires sont uniques. Leur conception, leur type et leur positionnement géographique seront différents les uns des autres. C'est la raison pour laquelle les études menées pour l'amélioration d'une infrastructure ne seraient pas forcément applicables

sur d'autres infrastructures du même type. La limitation de cette option nous ouvre une réflexion vers un système global qui serait capable de prendre en compte la diversité des types d'infrastructures linéaires.

Cette réflexion nous mène vers une perception et une définition du jumeau numérique d'une infrastructure linéaire non pas comme un seul système ou élément global, mais comme un système de systèmes (Figure IV-2). Le jumeau numérique est alors dans la suite des travaux considérés comme un système de visualisation et d'agrégation de données et d'informations issues de plusieurs autres systèmes.

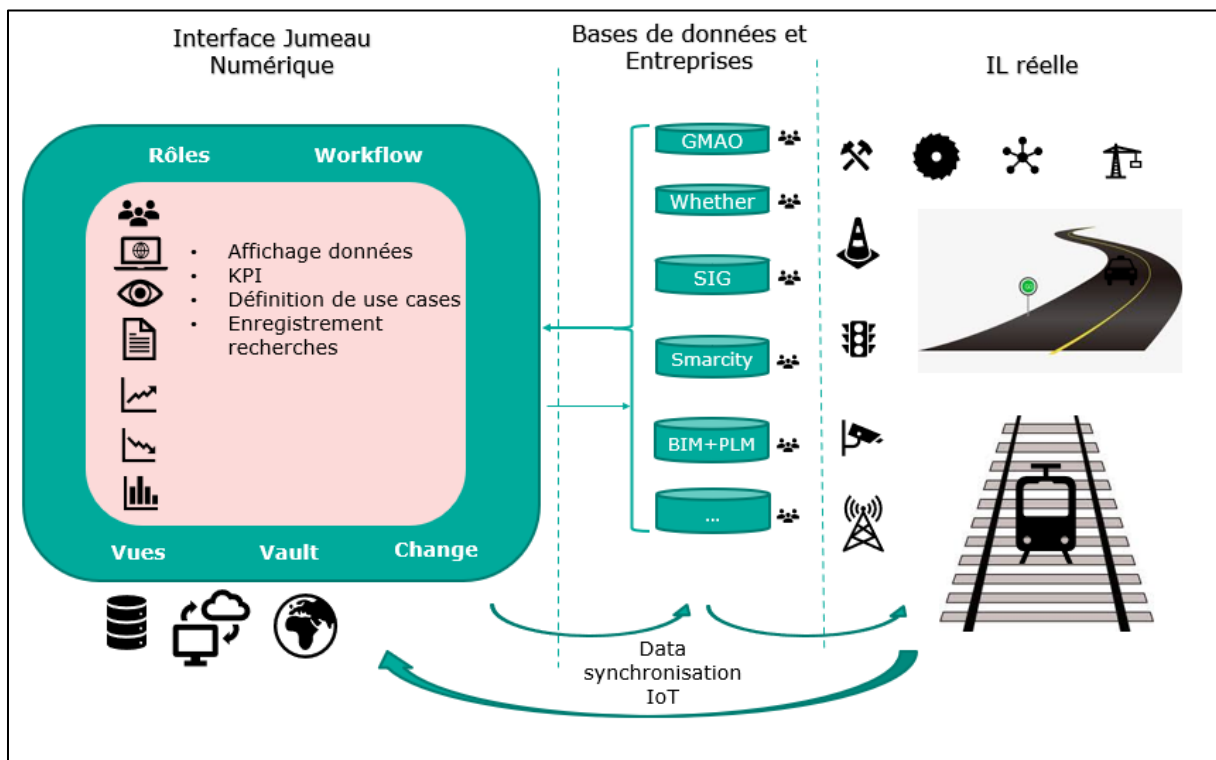


Figure IV-2 : Jumeau Numérique comme data visualizer

Les fondations sur lesquelles va s'appuyer le jumeau numérique ainsi défini consistent en une base couvrant les fonctionnalités PLM et BIM, comme l'illustre la Figure IV-3.

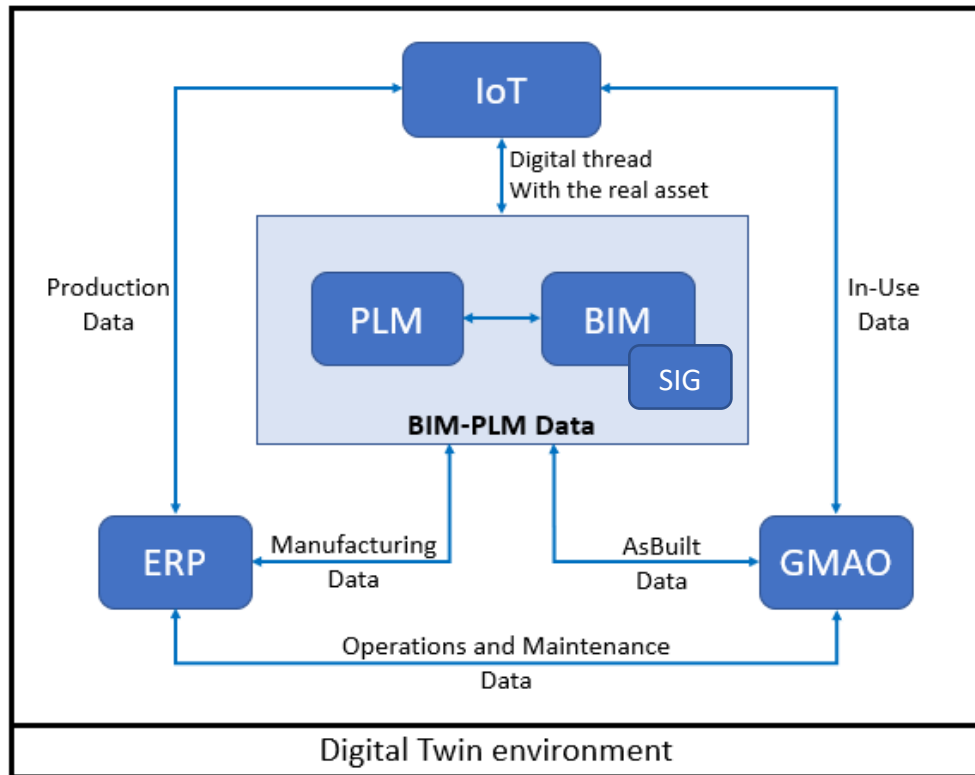


Figure IV-3 : Possible environnement logique de notre jumeau numérique

Les actions possibles sur la plateforme :

Comme évoqué plus tôt, les données affichées dans notre système jumeau numérique proviennent d'autres systèmes. Les actions propres à la gestion du cycle de vie de l'infrastructure en tant que produit, peuvent être entreprises par des systèmes et logiciels développés à dessein. Si on veut par exemple simuler la circulation sur un pont, ce jumeau numérique n'est pas le système adapté pour le faire. Tout comme, ce n'est pas sur ce jumeau numérique que l'infrastructure va être conçue, mais ce sera bien à travers des outils BIM adaptés.

En tant que « visualiseur » de données, les actions entreprises directement sur le jumeau numérique sont limitées. Il s'agit alors :

- De représenter de façon graphique tout type de données de l'infrastructure
- De définir les KPI du fonctionnement de l'infrastructure. Rappelons que ces KPI peuvent avoir une influence sur la rentabilité des opérateurs d'exploitation et maintenance.
- De définir des cas d'usages métiers. Cette possibilité a deux volets :
 - o Améliorer l'exécution des activités de maintenance ou de modification de l'infrastructure
 - o Enrichir le formalisme et les données représentées par le jumeau afin que son fonctionnement puisse inclure un nombre maximum de cas d'usages

métiers. L'enrichissement du jumeau numérique par définition des cas d'usages est indiqué plus tard dans ce chapitre

- D'enregistrer les requêtes faites sur le jumeau numérique afin de pouvoir les refaire plus rapidement.

L'intérêt de ce jumeau numérique apparaît lorsqu'une collaboration s'avère nécessaire entre différents acteurs. Un individu ayant des droits sur une base GMAO par exemple, n'a pas de droit sur la base BIM de conception. Afin d'obtenir certaines informations liées à la conception de l'infrastructure, un accès à toute la base BIM n'est pas forcément nécessaire. A travers le jumeau numérique, tout acteur aura un niveau de granularité de données nécessaire pour effectuer son métier.

Aussi, un acteur qui a accès à ce jumeau numérique peut, non pas créer ou modifier des données présentes dans des bases de données (de la 3^e colonne de la *Figure IV-2*), mais il peut émettre un avis, un commentaire, ou alors une demande de changement à exécuter par les acteurs directement dans les bases de données relatives à leur métier. Un exemple sur une prise de décision est donné au chapitre suivant. Les parties prenantes pour qui ce jumeau numérique représente un énorme intérêt sont les propriétaires et les opérateurs de maintenance. Ayant une vision globale, pas précise (pour plus de précision, il faut accéder directement à la base de données relevant des informations à afficher) du système, ils peuvent prendre une décision à travers ce jumeau numérique. Non seulement ces décisions impacteront l'infrastructure réelle, mais elles sont appelées à se répandre dans les bases de données d'information de l'infrastructure, à travers des workflows. Enfin, l'accès à ce jumeau numérique est régi par des fonctionnalités PLM. Certaines données peuvent être confidentielles. Donc les acteurs accéderont aux données sur le jumeau numérique en fonction de leur rôle et métier.

Ce jumeau numérique peut ainsi servir de support aux opérateurs de maintenance, qui ont accès aux informations issues des bases de données enrichies progressivement au cours du projet de construction. Ce qui leur permet d'affiner leurs activités d'exploitation et maintenance, et de contrôler leur rentabilité en faisant une étude d'impact de l'indisponibilité de leur infrastructure concédée. Ce jumeau numérique va également servir à enregistrer les événements et incidents majeurs que pourrait rencontrer l'infrastructure linéaire réelle.

4.4. Gestion de la maturité des données du jumeau numérique

Comme différentes littératures l'ont montrées plus tôt dans ce mémoire, le jumeau numérique évolue au cours du cycle de vie de son jumeau physique. Cette évolution peut se faire à travers des vues ou des configurations, à l'instar de ce qui se fait actuellement dans le PLM. Si le terme « vue » est utilisé dans ce chapitre, il ne réfère pas directement aux vues métiers, mais à un niveau de maturité des données. Ces vues ne sont pas universelles mais dépendent du cas d'étude. Ainsi, en se basant sur les résultats du troisième chapitre, nous nous proposons de définir pour le cycle de vie du jumeau numérique une vue préliminaire (*AsDefined*),

et quatre vues principales : **AsDesigned**, **AsPlanned**, **AsBuilt** et **InService** (Figure IV-4). Elles représentent la structuration des données figées à la fin d'une phase de projet (*AsDesigned*, *AsPlanned*, *AsBuilt*) ou alors au cours de la phase d'exploitation et maintenance (*InService*)

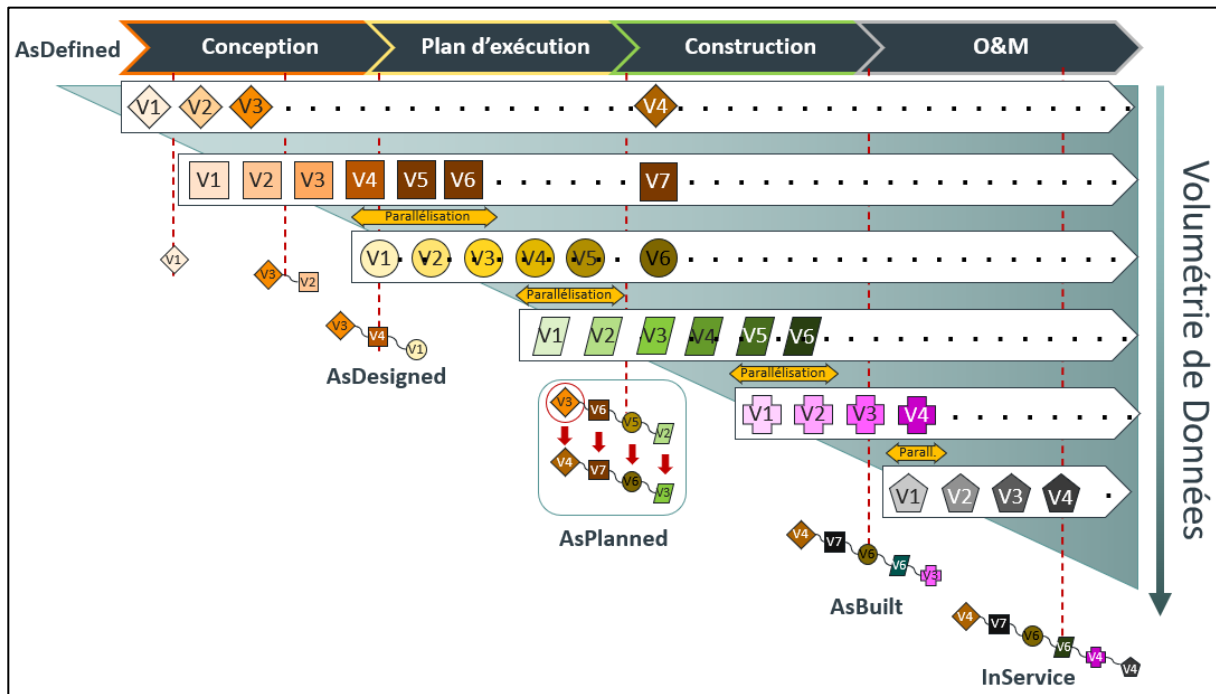


Figure IV-4 : Différentes vues du Jumeau Numérique au cours de son cycle de vie

4.4.0. AsDefined

C'est le point d'entrée du cycle, la vue initiale de notre jumeau numérique. Cette vue trace la structure générique d'un type d'infrastructure identifiée. L'intérêt de ce point d'entrée est d'avoir des éléments communs de composition entre toutes les déclinaisons d'un type d'infrastructure linéaire, ce qui n'est plus le cas pour les vues suivantes, où la représentation de données devient unique, car adaptée à une infrastructure physique existante. La vue *AsDefined* regroupe ainsi tous les types de l'infrastructure donnée. Les données présentes concernent l'arborescence produit et les configurations applicables. A ce niveau, on ne peut pas encore parler de jumeau numérique. L'arborescence produit existante consiste en la définition des objets et groupes d'objets, leur nom, mais pas d'information technique. La nomenclature complète intègre les différentes configurations de l'infrastructure.

Aucune correspondance avec une infrastructure physique existante, c'est la raison pour laquelle il n'y a pas de 3D. Les items n'étant pas modifiables, ils ne sont pas soumis aux attributs de version et d'itération. Toutefois, il existe un numéro de version de l'arborescence. Le passage au *AsDesigned* se prépare en sélectionnant une configuration applicable.

4.4.1. AsDesigned

La vue *AsDesigned* correspond à l'agrégation de toutes les données de conception. En plus des informations issues de la vue *AsDefined*, la vue *AsDesigned* intègre la spécification des objets, les exigences de construction, ainsi que l'effectivité des objets. Les objets PLM sont liés à leur représentation BIM. Les valeurs des données sont renseignées. Ce sont les données originelles lors de construction de l'infrastructure linéaire en question. Le passage *AsDefined* au *AsDesigned* se fait lorsque la vue précédente (qui contient des données génériques et communes à toutes les configurations du type d'infrastructure linéaire d'étude) a été contextualisée à une infrastructure linéaire en particulier, et a permis de générer les données propres à une infrastructure précise et lorsque les données et informations techniques, géométriques (3D BIM), contextuelles (SIG) sont implémentées dans la plateforme. Les objets PLM sont liés à leur 3D BIM. Ils représentent l'implémentation d'une instance de produit, en l'occurrence l'infrastructure étudiée.

Les items sont désormais soumis aux attributs de révisions et d'itérations. Ce qui nous permet d'intégrer les notions d'effectivité et d'applicabilité. Sa valeur est modifiée uniquement à cette vue du cycle de vie, et elle permet de préciser la version du design qui est actuellement utilisée. Les vues suivantes ne permettent pas de modifier cette valeur. Cette valeur est la même pour toutes les pièces d'une arborescence produit. Il est également possible d'enregistrer plusieurs alternatives de design. La gestion des alternatives de design est la gestion du développement parallèle de plusieurs pistes, répondant toutes aux spécifications de l'infrastructure. L'analyse de ces alternatives, permettant de révéler les avantages et inconvénients de chacune, mène à la sélection d'une parmi toutes, pour sa mise en œuvre. L'intérêt de conserver l'historique des alternatives non-retenues et de pouvoir réemployer une des solutions alternatives plutôt que celle préférée pour différent changement des critères de décisions au moment du choix initial (immaturité de technologie, coûts trop élevé...).

4.4.2. AsPlanned

La vue *AsPlanned* permet de préparer la phase de construction. On y retrouve ainsi les spécifications sur les produits finis/semi-finis et les outillages. La construction elle-même est gérée par l'ERP dans l'industrie. On fait l'ingénierie de la construction. Cette vue sert d'intermédiaire entre le *AsDesigned* et le *AsBuilt*. Elle sert aussi à envoyer des informations à un autre système de gestion de la production (ERP). Elle contient tous les éléments de réalisation ainsi que toute la logique avec laquelle l'infrastructure est construite. C'est la phase de réalisation du design précédemment défini. L'utilisation du jumeau numérique permet à ce stade de planifier les travaux futurs sur l'infrastructure linéaire ou aux alentours de celui-ci.

Seules les modifications mineures sont autorisées à cette vue, impliquant alors une modification de l'itération. Aussi, il n'est pas possible de modifier l'effectivité. Le passage au *AsBuilt* est possible lorsque la structure *AsPlanned* a été validée et lorsque que tous les ordres de travaux ont été réalisés (*Figure IV-5*).

4.4.3. AsBuilt

La vue *AsBuilt* est figée et rassemble toutes les informations de l'infrastructure, juste après sa toute dernière modification. L'objectif est d'avoir une « photo » de la composition exacte de la structure : N° de lot, N° de série de chaque pièce, usine de production, machines utilisées, etc. C'est sur cette vue qu'on va s'appuyer pour appliquer toutes les activités de maintenance. On y retrouve ainsi la structure des objets construits, les coûts, les différents ordres de travaux/modification, ainsi que les procédures de tests. *AsBuilt* rassemble toutes les informations du *AsPlanned* (MBOM faite conjointement entre le PLM et le ERP).

Vu qu'il s'agit d'une vue calculée, aucune modification n'y est possible. Toute modification entraîne un changement et modification de vue. En cas de modification mineure, on repasse par la vue *AsPlanned*, et par la vue *AsDesigned* en cas de modification majeure. Le passage au *InService* n'est possible qu'une fois le jumeau numérique est connecté à l'infrastructure linéaire physique réelle (Figure IV-5).

4.4.4. InService

Il correspond à la phase d'exploitation et maintenance.

Depuis le tel-que-construit, l'infrastructure linéaire subit des modifications et des altérations liées à l'exploitation, aux maintenances passées, ainsi qu'au vieillissement des équipements constituant l'infrastructure. Il est donc opportun d'avoir l'état actuel de l'infrastructure linéaire pour pouvoir déceler certaines défaillances et anticiper certains travaux. Cette vue correspond à la définition la plus répandue du jumeau numérique qu'on trouve dans la littérature.

Tout comme la vue *AsBuilt*, en cas de modification mineure, on repasse au *AsPlanned*, et au *AsDesigned* en cas de modification majeure (Figure IV-5). En revanche, les modifications de valeurs liées à la remontée des informations du réel restent possibles. Dans ce cas, seul l'itération est modifiée. *InService* est lié à la GMAO.

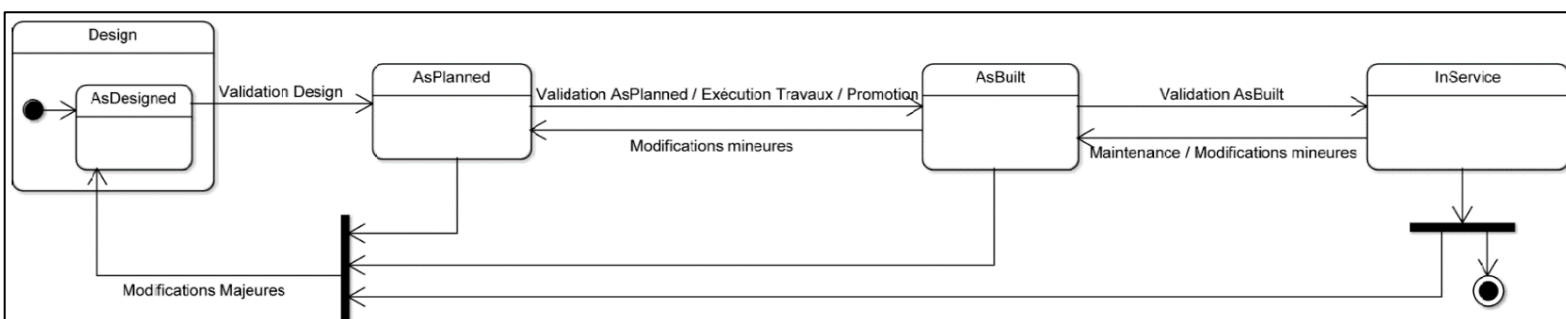


Figure IV-5 : Transitions possibles entre les différentes vues du Jumeau Numérique

Sur la *Figure IV-5*, nous appelons modification « majeure » toute modification qui a un impact sur les plans d'exécution, de construction ou de fonctionnement de l'infrastructure linéaire. De même, nous appelons modification « mineure » toute modification qui n'a pas d'impact sur les plans d'exécution, de construction ou de fonctionnement de l'infrastructure linéaire. Ainsi dans le scénario illustrée en *Figure IV-6*, les transitions 1 et 6 sont considérées comme des modifications majeures, tandis que les 2,3, 4 et 5 sont considérées comme mineures.

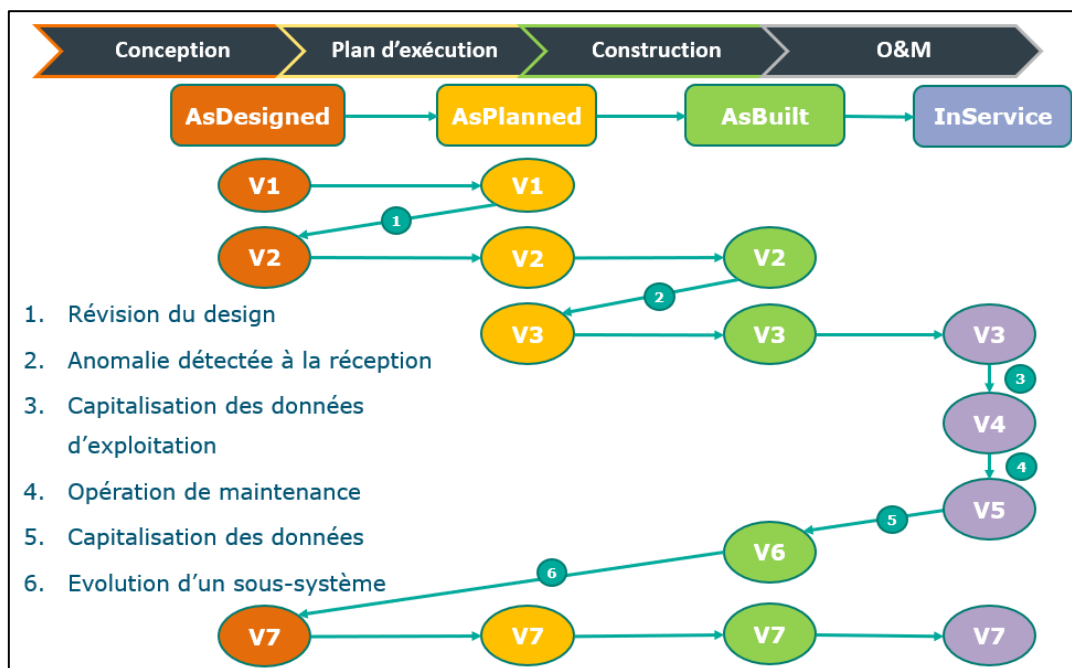


Figure IV-6 : Exemple de scénario possible de transitions entre les différentes vues du Jumeau Numérique

4.5. Approches pour la représentation numérique d'une infrastructure réelle

Le besoin d'une représentation virtuelle de la réalité est aujourd'hui assez commun à tous les domaines d'ingénierie. Cette représentation virtuelle, nous l'appelons jumeau virtuel ou numérique. Dans les chapitres précédents, nous avons montré à quoi pouvait servir un digital twin. Dans cette partie, nous proposons une approche méthodologique pour concevoir un digital twin. Il est important de souligner que nous nous concentrons davantage sur la conception et le développement de digital twin plutôt que sur le produit physique lui-même. La conception et le développement du produit physique tirent évidemment parti du digital twin. Pour un développement de produit physique, avant de parler de la 3D, une analyse fonctionnelle approfondie est faite. Le digital twin pris comme produit, doit suivre le même chemin.

Nous distinguons deux types de représentation : une représentation fonctionnelle et une représentation réelle.

4.5.1. Représentation fonctionnelle d'une infrastructure réelle

La conception de digital twin commence avant celle du produit physique. En tant que système, il a de nombreuses fonctions. Classiquement, le terme « Jumeau » ne prend son essence qu'à partir du moment où il existe une personne semblable, au même stade de développement. Si on transpose cette considération au monde numérique, le jumeau numérique a plus de sens une fois qu'il représente un produit réalisé (et non en cours de réalisation) et prêt à l'usage. C'est la raison pour laquelle la plupart des fonctionnalités d'un jumeau numérique serait plus adaptée à des usages en phase d'exploitation et maintenance. [Forgues et al. 2019] regroupent ces fonctionnalités en quatre catégories : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie. Cela étant dit, le lien entre la conception fonctionnelle et le jumeau numérique est évident. Comme l'indiquent [Hirtz et al. 2002], la modélisation fonctionnelle offre une méthode abstraite, mais directe, pour comprendre et représenter une fonction globale du produit. Aussi, elle guide stratégiquement les activités de conception telles que la décomposition des problèmes, la modélisation physique, l'architecture produit, la génération de concepts et l'organisation d'équipe. Cette représentation fonctionnelle concerne tous les modèles décrivant toutes les fonctions et le comportement de notre système. L'ingénierie des systèmes fait partie de la représentation fonctionnelle, l'ingénierie des exigences également. L'ingénierie système peut être défini comme un ensemble de composants qui se combinent pour exécuter une fonction système. Exigences système, fiabilité, logistique, coordination de différentes équipes, test et évaluation, maintenabilité et de nombreuses autres disciplines nécessaires à la réussite de la conception, du développement, de la mise en œuvre et de la mise en service définitive du système deviennent plus difficiles lorsqu'il s'agit de projets de grande envergure ou complexes. Méthode intégrant toutes les disciplines dans la même modélisation, l'ingénierie système permet de gérer cette complexité. Cette représentation fonctionnelle s'appuie sur des modèles fonctionnels. On peut la considérer ainsi comme une ingénierie système basée sur les modèles (Model-Based System Engineering MBSE).

4.5.2. Représentation physique à grande échelle d'une infrastructure réelle

L'un des usages d'un digital twin est d'anticiper et d'optimiser les activités de maintenance du système physique. Ces activités dépendent fortement de l'état actuel du système physique. Il est donc important pour le digital twin de représenter pratiquement toute la réalité physique. L'importance des détails 3D soulève une discussion : jusqu'à quel niveau de précision doit-on représenter notre infrastructure linéaire ? Il ne semble pas pertinent de représenter tous les détails « rivets, boulons, vis, etc. » d'une infrastructure linéaire . Il faut donc définir le bon niveau de détails. Cette représentation virtuelle est rendue possible avec les modèles CAO et CAE. La représentation physique du digital twin est constituée de toute la modélisation

physique de l'infrastructure à représenter. Comme indiqué précédemment, nous avons en BIM le niveau de détail basé sur les phases du projet, un concept qui n'existe pas encore dans le digital twin. Si l'on fait le parallèle, un digital twin ou l'une de ses instances doit à terme (avant le début de la maintenance) correspondre à un BIM LOD 500 (représentation du tel-que-construit). Le niveau 500 est le niveau final de développement qui représente l'ouvrage tel qu'il a été construit. Modèle adapté aux besoins de la phase d'exploitation et de maintenance, cette représentation identique d'une œuvre, détails pour détails, est avantageuse en ce qu'elle permet de représenter non seulement tous les détails utilisés en O&M, mais tout autre détail physique de la pièce. Ici, nous avons un jumeau virtuel de notre objet. Cette étape représente le « graal » de l'industrie du bâtiment. En effet, cela permet au gestionnaire de fortune de disposer d'une version numérisée de ses actifs pour mieux les gérer. Cependant, s'il peut être intéressant de représenter toutes les informations, il n'est pas forcément pertinent de le faire. Dans le cas d'une infrastructure linéaire, la première raison est l'impossibilité de représenter toutes les informations. En effet, rappelons qu'une infrastructure linéaire est une infrastructure dont la linéarité et la longueur conditionnent la structuration du projet, et sur laquelle des conditions géotechniques et topographiques sont fortement interactives. Compte tenu de la taille des ouvrages, il nous est techniquement impossible de représenter le système entier, mais uniquement des parties du système. Et même si l'on pouvait le faire, la lourdeur des fichiers rendrait l'exploitation des données difficile. En effet, les différentes informations proviennent d'un trop grand nombre de systèmes externes. Cela rend l'analyse des données beaucoup plus longue. Comme les modèles CAO et IAO sont liés à des modèles fonctionnels, ces représentations physiques à grande échelle sont complémentaires à la représentation fonctionnelle. En effet, sur les différents modèles, les composants physiques de l'infrastructure sont liés les uns aux autres par des modèles de comportement et de fonctionnalité.

4.5.3. Nouvelle approche complémentaire : une approche basée sur des cas d'usages.

Malgré leurs avantages, l'ingénierie système et la représentation physique d'une réalité ne peuvent répertorier et modéliser de manière exhaustive toutes les utilisations d'une infrastructure. En fait, le produit évolue au cours de son cycle de vie jusqu'à ce qu'il se forme pleinement, avec un certain comportement émergent [Grieves 2011]. Pour atteindre ces comportements finaux, les concepteurs définissent les exigences du système qui conduisent à un comportement souhaité du système. Certains comportements indésirables sont identifiés pour les prévenir. La difficulté réside dans le fait qu'il est plus facile de lister les comportements souhaités que d'identifier toutes les manières possibles par lesquelles le système peut évoluer. Plus qu'une réplique d'une réalité physique, un jumeau numérique est orienté vers des cas d'usages, c'est-à-dire que tout utilisateur de jumeau numérique doit être capable de simuler tous les comportements et contextes du système physique, de l'attendu à l'inattendu.

4.5.3.1. Enrichissement d'un jumeau numérique à l'aide des cas d'usages

Les approches précédentes sont actuellement complémentaires pour le développement et la conception d'un jumeau numérique. Ces approches intègrent les usages prévus de l'infrastructure et du digital twin. La liste des utilisations est souvent définie lors de la phase de conception. Contrairement à l'aéronautique et à l'automobile, les phases de conception du domaine de la construction sont beaucoup plus courtes et l'absence de prototype physique implique un plus grand risque d'erreur. La propagation d'une erreur de conception peut s'avérer dangereuse voire mortelle pour les usagers (embouteillage au passage à niveau, déraillement d'un train...).

Lors de la définition d'approches conventionnelles pour définir des systèmes complexes, [Grievies et Vickers 2017] énumèrent les catégories de comportement du système. Sous les catégories de comportements prédits et non prédits, nous avons des sous-catégories de comportements souhaitables et indésirables. Les approches précédentes de digital twin se limitent au comportement prédit. Les comportements indésirables non prédits peuvent se transformer en problèmes graves et catastrophiques. Il faut se concentrer sur des méthodologies pour supprimer les problèmes graves ou pour réduire les problèmes imprévus. Afin d'anticiper ces erreurs potentielles, notre digital twin doit pouvoir intégrer les scénarios de fonctionnement spécifiques, qui permettent de réduire et/ou éliminer l'impact de ces erreurs.

Pour ce faire, nous proposons une amélioration de la conception du digital twin basée sur les cas d'usages. La vision est d'avoir un digital twin qui réponde à tous les cas d'usages bien identifiés et caractérisés, définis pour et par les métiers. Comme le rappellent [Schleich et al. 2017], le digital twin n'est pas seulement un modèle complet du produit physique, mais c'est un modèle dont la granularité est adaptée à leur usage et qui évolue tout au long du cycle de vie du produit. Cette vision sous-tend le déploiement progressif du digital twin à partir de cas d'usages construisant toutes les fonctions essentielles d'exploitation et de maintenance du système. Chaque utilisation peut ainsi conduire à la création de différentes vues du digital twin. Cette croissance par cas d'usages enrichira la base de connaissances digital twin, rendant son jumeau physique et lui plus intelligents, plus autonomes et plus réactifs face à des événements inconnus.

4.5.3.2. Étapes vers l'enrichissement par cas d'usages

Dans la section précédente, nous avons défini les avantages de nos techniques. Dans cette section, nous proposons des étapes formelles pour poser les bases d'un jumeau numérique optimal (*Figure IV-5*). Notre proposition prend réellement forme à l'étape 4, lorsque nous avons un jumeau physique existant.

La première étape consiste en l'analyse faite sur les fonctionnalités du système linéaire à construire. Au cours de cette phase, à travers des modèles fonctionnels et physiques, nous pouvons commencer à construire un « prototype » numérique avancé. Un prototype est un

modèle original qui possède toutes les qualités techniques et les caractéristiques de fonctionnement d'un produit futur, mais c'est aussi parfois une copie incomplète (et non définitive) de ce qui pourrait être le produit final. À ce stade, les modèles BIM peuvent être considérés comme prototypes de jumeau numérique.

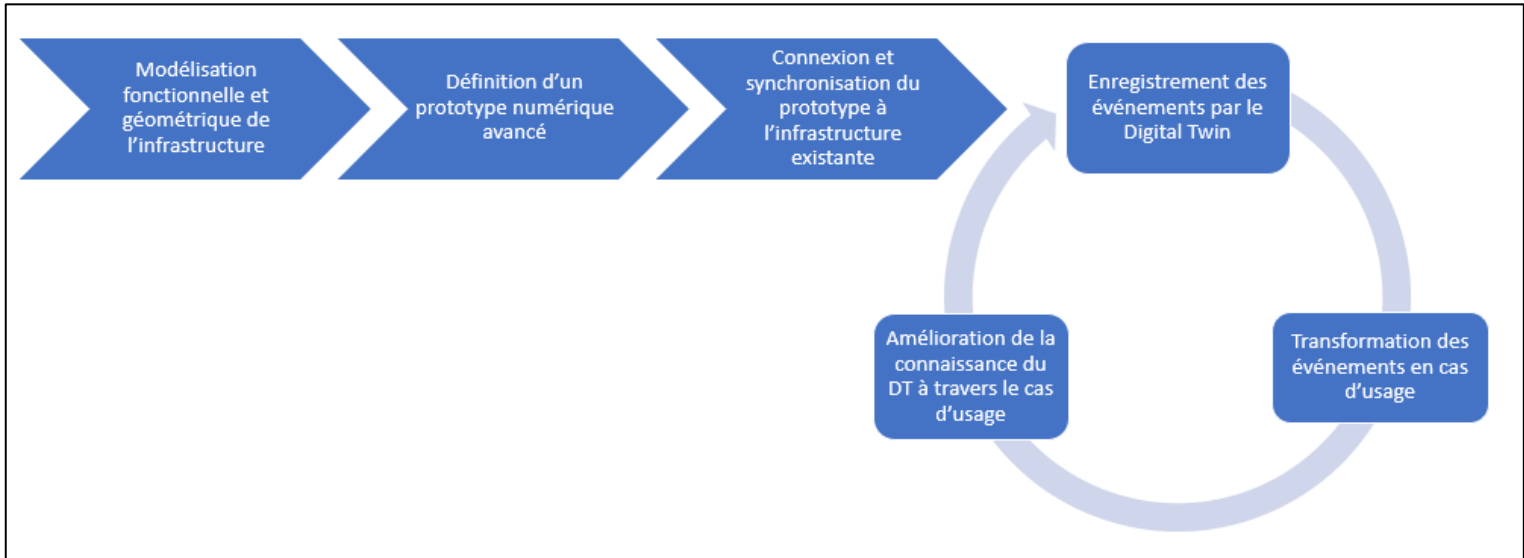


Figure IV-7 : Étapes vers l'enrichissement d'un jumeau numérique par cas d'usage

L'étape suivante concerne la validation du projet via le prototype numérique. Comme nous n'avons aucun prototype physique en construction, l'objectif du prototype numérique est de conforter les choix techniques avant une mise en œuvre coûteuse et (presque) irréversible. Pour améliorer le processus de conception, le prototype virtuel traite de multiples changements de conception, ce qui crée plusieurs itérations de notre prototype ou de ses composants. Chaque itération est une étape de validation. Par conséquent, la prochaine itération de prototype sera meilleure que la précédente. Les petites boucles sont entreprises jusqu'à une itération finale du prototype, ce qui permet le lancement de la phase de construction. Le prototype sert ici à valider les choix effectués lors de la conception, à préparer des données ou divers éléments de retour utiles à la validation d'hypothèses, à préparer des spécifications techniques et à rédiger des instructions ou des manuels d'utilisation ou d'édition.

À la troisième étape, nous avons l'infrastructure linéaire construite. Le jumelage commence une fois que des objets IoT bien localisés démarrent le flux de données entre un objet physique et son jumeau virtuel. À ce stade, l'écosystème des systèmes TIC pour le jumeau numérique doit être défini. Pour les industries de la construction, les systèmes TIC peuvent être composés d'un système informatisé de gestion de la maintenance (GMAO), de la météo, du BIM et du système d'information géographique (SIG). Il est donc important de définir les protocoles de communication entre notre digital twin et toutes ces bases de données existantes.

tantes. Les IoT sont souvent associés au jumeau numérique. Leur installation, leur implémentation, et leur connexion pour la remontée de données peuvent s'avérer fastidieuses et coûteuses sur des infrastructures déjà existantes. C'est la raison pour laquelle notre système à venir ne vise pas à installer ou créer de nouveaux IoT, mais plutôt capitaliser toutes les informations provenant des IoT et capteurs déjà installés sur l'infrastructure.

La quatrième étape consiste à enregistrer les événements. Une fois que les jumeaux numérique et physique se mettent à jour et échangent des informations, certains événements imprévus peuvent se produire sur le jumeau physique, par exemple : déraillement de train, tremblements de terre, collision de véhicules. L'un des quatre aspects de digital twin est la surveillance. Cet événement imprévu atteindra évidemment le digital twin via les objets IoT, ou via une mise à jour manuelle. Le digital twin doit enregistrer l'occurrence de cet événement et ses caractéristiques. Le digital twin doit également enregistrer la réaction/le comportement du système physique. Ces événements peuvent apparaître en raison de facteurs externes tels que la météo, les erreurs humaines, d'autres objets physiques.

L'être humain intervient alors à la cinquième étape. Il peut arriver que la réaction de la construction ne soit pas pertinente et ne puisse pas résoudre ou proposer une solution de contournement du problème. Afin d'améliorer ses connaissances, les ingénieurs, la maintenance et le titulaire de digital twin peuvent transformer ces événements inattendus en cas d'usage. De cette manière, nous pouvons proposer l'action de contre-retour de l'élément physique comme solution du problème. L'enregistrement également du calendrier des événements peut permettre à l'ingénieur de prévenir et d'anticiper ce type d'événements destructeurs. Cela conduira un jumeau numérique à se rapprocher du jumeau physique dans son monde réel.

Le potentiel du jumeau numérique sera maximisé à cette étape finale. Après une cinquième étape répétitive, le digital twin est optimisé et la base de connaissances est améliorée. Et le digital twin se rapproche du jumeau physique du point de vue de l'utilisateur : à ce stade, on parle d'automatisation. L'échange de données et la commande sont automatisés depuis le digital twin. Les commandes peuvent être envoyées automatiquement aux équipes de maintenance.

Ces propositions méthodologiques de définition et de mise en place d'un jumeau numérique d'infrastructure linéaire constituent un enrichissement de l'état de l'art du jumeau numérique, en ce sens qu'elles proposent de nouvelles perspectives de la notion du jumeau numérique.

Conclusion

Après la définition de la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire en chapitre 3, ce quatrième chapitre propose une adaptation des concepts existants pour proposer un framework qui supporte ledit cycle de vie. Cette adaptation résulte en un système ou ensemble de systèmes agrégeant des fonctionnalités qui permettent de gérer dans le temps l'évolution des données. Les systèmes identifiés sont PLM, BIM, SIG, GMAO, IoT. Combinés, ils permettent de constituer un système de jumeau numérique de l'infrastructure linéaire.

Les exigences projet mènent à définir un et un seul jumeau numérique afin d'éviter la multiplication de jumeaux numériques, et de limiter la répétition de données. Ce digital twin n'a pas vocation de représenter fonctionnellement l'infrastructure linéaire, ni d'être une représentation exacte de l'infrastructure. En effet, la problématique d'échelle rend difficile de représenter numériquement les détails de tous les objets d'une infrastructure linéaire. Nous sommes arrivés au fait que le jumeau numérique doit être un élément numérique qui prend en compte tous les cas d'usages métiers et permet de les simuler, tout en laissant la possibilité d'anticiper et d'intégrer tout type d'événements futurs, même les imprévus. Un tel jumeau numérique s'enrichit ainsi à travers des cas d'usages métiers concrets.

Positionné comme visualiseur et agrégateur de données issues de systèmes existants, notre jumeau numérique permettra de gérer l'évolution des différentes vues. Si ce chapitre définit un contexte ou un cadre d'application et reste théorique, il ne fournit pas d'exemple de cas pratique. Ce sera tout l'essence du prochain chapitre, avec une application sur les passages à niveau.

Cinquième Chapitre :

Expérimentation sur passage à niveau

V. Expérimentation sur passage à niveau

Le terme « jumeau numérique » rappelle indirectement la présence d'un jumeau physique, avec lequel il est connecté. Pour mettre en application notre méthodologie, nous avons choisi le cas d'emploi d'un passage à niveau (PN). Il s'agit d'une infrastructure linéaire assez complexe, qui est une intersection entre deux systèmes linéaires différents (infrastructures routière et ferroviaire). Sa conception, son entretien et son fonctionnement sont très critiques. Une des problématiques connues est la sécurité de ses usagers. Le jumeau numérique (aux cas d'usage maximisés) d'un passage à niveau est capable de simuler et de reproduire tous ces événements, avec une cause identifiée, et de proposer une solution provisoire.

Ce chapitre consiste à appliquer le développement du jumeau numérique proposé au quatrième chapitre. Ainsi, il sera d'abord question de décrire l'objet d'étude : sa définition, ses différentes caractéristiques, son fonctionnement, les acteurs impliqués, pour terminer enfin sur sa problématique de sécurité. La prochaine étape sera de spécifier le système jumeau numérique lorsqu'il est appliqué à l'objet d'étude. Enfin, il sera question de déterminer des cas d'usages métiers autour du jumeau numérique. Ces cas d'usages qui définissent la manière dont est utilisé le jumeau numérique, et sa valeur ajoutée pour les utilisateurs du système.

Ces travaux se focalisent sur le PN de Romilly-sur-Seine, qui présente une configuration géographique particulière et qui se trouve près d'une gare ferroviaire. La présence d'une gare ferroviaire à proximité immédiate d'un passage à niveau en agglomération peut également induire des facteurs de dangerosité/criticité de la part des usagers du PN (comme un temps d'attente rallongé).

5.1. Définitions et considérations techniques

Si la *Figure V-1* donne une illustration graphique d'un PN, elle ne représente pas l'exhaustivité des informations d'un PN, elle ne le définit pas et ne le catégorise pas. En *Annexe A*, on retrouve les différents types de passages à niveau.

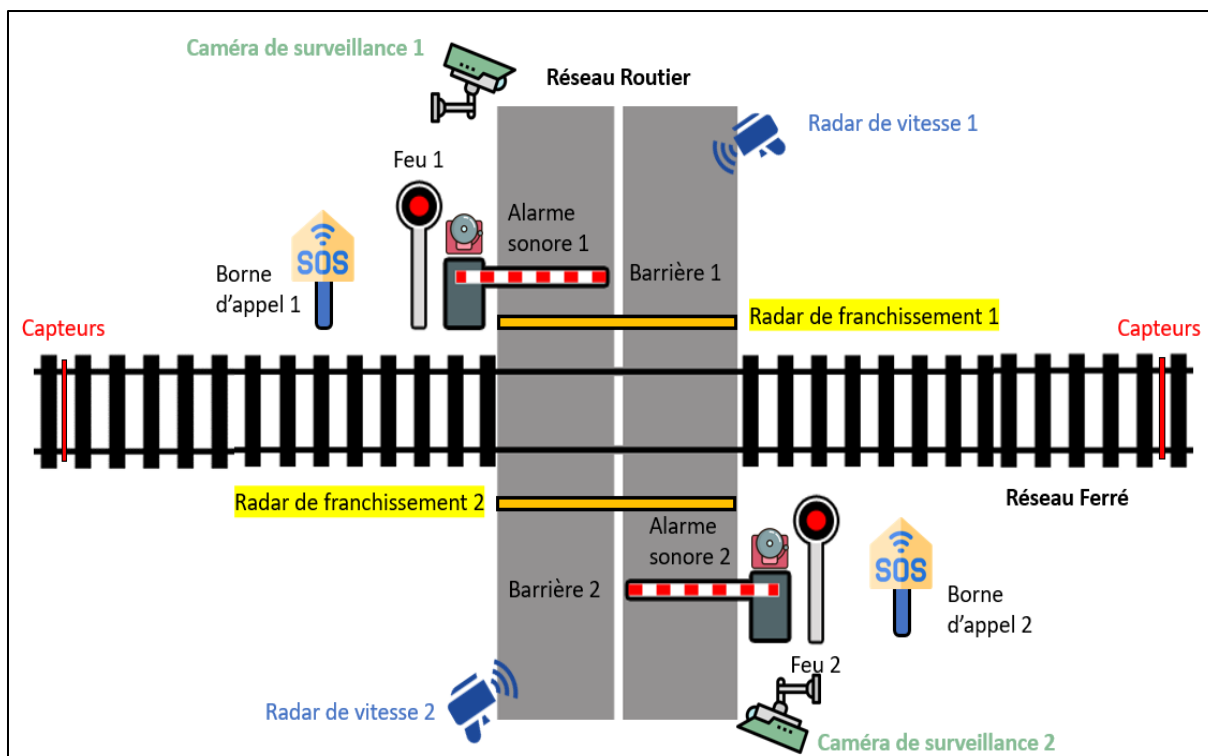


Figure V-1 : Illustration graphique d'un passage à niveau

5.1.1. Définition

Un passage à niveau est le point d'intersection d'une voie ferrée et d'une voie routière ou piétonnière. Les termes « à niveau » précisent que les deux voies précédentes se trouvent à la même hauteur, et marquent ainsi une différence avec les croisements en ponts ou en tunnels. Ce présent rapport n'aborde pas les tramways ni les chemins de fer touristiques qui ont des spécificités différentes. Une autre définition est proposée par le Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) : intersection entre une voie routière et une voie de chemin de fer (à l'exclusion des voies ferrées implantées sur plateforme routière) maintenant la continuité (réglementaire) du site propre ferré. Les passages à niveau sont gérés par le Ministère chargé des transports.

Avant d'arriver à son fonctionnement, il faut préciser qu'il existe plusieurs principes concernant les PN. Un de ces principes est que le chemin de fer a la priorité sur les usagers de la route. Un train, vu son poids qui peut dépasser 1500 tonnes, n'a pas le temps de s'arrêter lorsqu'il voit un obstacle. Lancé à 90 km/h, il lui faut 800 mètres pour s'arrêter, soit 10 fois plus qu'une voiture [SNCF Réseau 2019]. Cette priorité est un principe permanent et fondamental, inscrit dans la réglementation française. La signalisation routière et les équipements prescrits par la réglementation spécifique aux passages à niveau ont pour fonction essentielle de rappeler cette règle aux usagers de la route. L'article R422-3 du code de la route indique :

- Lorsqu'une voie ferrée est établie sur une route ou la traverse à niveau, la priorité de passage appartient aux matériels circulant normalement sur cette voie ferrée.

- Aucun conducteur ne doit s'engager sur un passage à niveau si son véhicule risque, du fait de ses caractéristiques techniques ou des conditions de circulation, d'y être immobilisé.
- Tout conducteur doit, à l'approche d'un train, dégager immédiatement la voie ferrée de manière à lui livrer passage.

Le passage à niveau est ainsi la rencontre entre deux domaines linéaires aux caractéristiques différentes et dont il faut définir les limites et les impacts d'un sur l'autre. Conformément à l'arrêté du 24 novembre 1967 relatif à la signalisation des routes et des autoroutes, et à l'Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (IISR), les gestionnaires de ces deux domaines sont conjointement responsables de la signalisation routière réglementaire aux PN. La signalisation doit être visible à tout instant, de jour comme de nuit.

5.1.1.1. *Le domaine ferroviaire*

Le *Code général de la propriété des personnes publiques* (Articles L. 2111-14 et L. 2111-15) précise la consistance du domaine ferroviaire : voies ferrées, ouvrages servant à la protection et à la conservation des voies, bâtiments affectés à la réception et aux transports des voyageurs et marchandises... En pratique, sur un passage à niveau, la limite entre le domaine routier et le domaine ferroviaire n'est pas toujours évidente. On prend, par défaut, le prolongement des barrières, des feux R24 ou de la signalisation de position. Outre les barrières et les feux R24, la signalisation de position inclut également les signaux G2, les portiques, les croix de Saint André, et les panneaux STOP. Il s'agit de la signalisation à proximité directe du PN. Toutefois, si le gestionnaire routier constate une anomalie concernant la signalisation de position, il doit alerter le plus rapidement possible l'exploitant ferroviaire.

5.1.1.2. *Le domaine routier*

Le *Code de la Voirie routière* (Articles L. 111-1, L. 113-2, L. 114-1 à L114-4) précise que « *le domaine public routier comprend l'ensemble des biens du domaine public de l'État, des départements et des communes affectés aux besoins de la circulation terrestre, à l'exception des voies ferrées* ». Le domaine routier est responsable de la signalisation avancée c'est-à-dire les panneaux et panonceaux routiers, les balises J10.

Les passages à niveau en France sont traversés chaque jour par 16 millions de véhicules, selon la SNCF. Ce nombre de passage routier couplé au trafic ferroviaire contribue à définir la dangerosité d'un PN. Le couplage de ces trafics ont conduit à définir la notion de moment de circulation. Le moment est défini par [Légifrance 2019], comme « *le produit arithmétique du nombre moyen journalier, calculé sur l'année, des circulations ferroviaires par le nombre moyen journalier des circulations routières également calculé sur l'année.* » Le moment est utilisé de façon large pour évaluer la dangerosité des PN. Le projet MORIPAN (Modèle de

Risque au Passage à Niveau) [Cazier et al. 2018] note toutefois que la meilleure corrélation de risque n'est pas identifiée avec une valeur du moment égale au produit $V \times T$ telle qu'elle est prise en compte dans les différents modèles de référence existants, mais l'a été avec une valeur égale au produit $V^{0,354} \times T^{0,646}$, où V et T représentent la fréquentation du passage à niveau respectivement en nombre d'automobiles et de trains. Ainsi, les passages à niveau munis d'un fort moment de circulation sont munis de barrières (moment supérieur à 5 000). Les passages à niveau sont parfois munis d'un téléphone, pour prévenir les gestionnaires du chemin de fer, et d'un plan indiquant le passage à niveau le plus proche, le tout en cas de besoin.

SNCF Réseau fait de la sécurité aux passages à niveau une de ses priorités et renforce chaque année sa politique de sécurisation et de prévention aux abords des passages niveau. Certains passages à niveau sont considérés comme étant prioritaires, et ont été inscrits au programme de sécurisation national, programme défini par l'Etat et l'instance nationale des passages à niveau en 1997 [SNCF Réseau 2019]. Cette instance se réunit deux fois par an. Au 4 avril 2019, on compte 153 passages à niveau inscrits au programme de sécurisation national (contre 437 en 1997), dont la quasi-totalité est équipée de feux à diode permettant une meilleure visibilité.

5.1.2. Objet de l'étude : passage à niveau de Romilly-sur-Seine.

Notre objet d'étude est le passage à niveau près de la gare SNCF de Romilly-sur-Seine. Il s'agit d'un PN de 1^{ère} catégorie, SAL à quatre demi-barrières (SAL 4), comme l'illustre la *Figure V-2*.

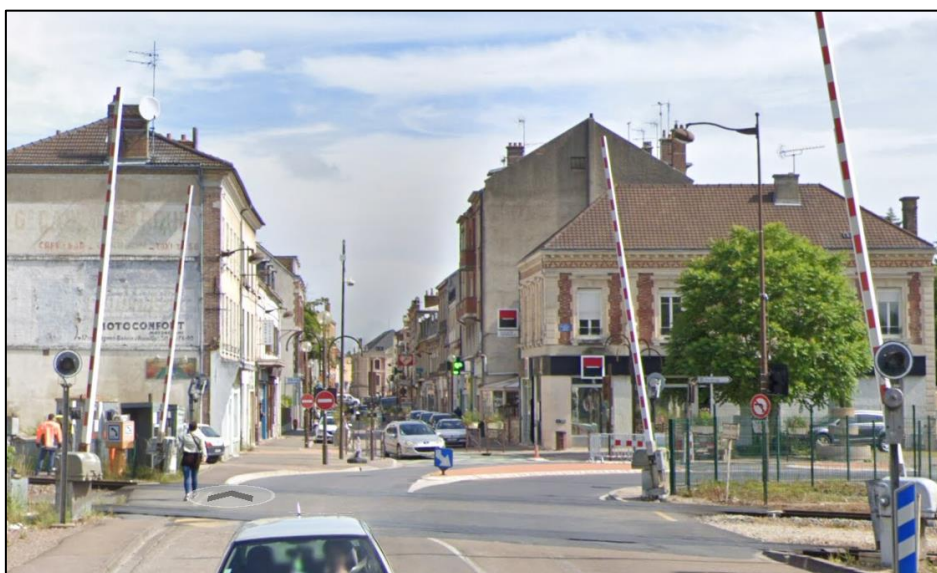


Figure V-2 : Passage à Niveau près de la gare de Romilly/Seine

Le choix s'est porté sur ce cas d'étude du fait de sa proximité à une gare ferroviaire, sa localisation en pleine ville, la proximité à un carrefour, et la présence un peu loin d'un giratoire et d'un pont (Figure V-3).

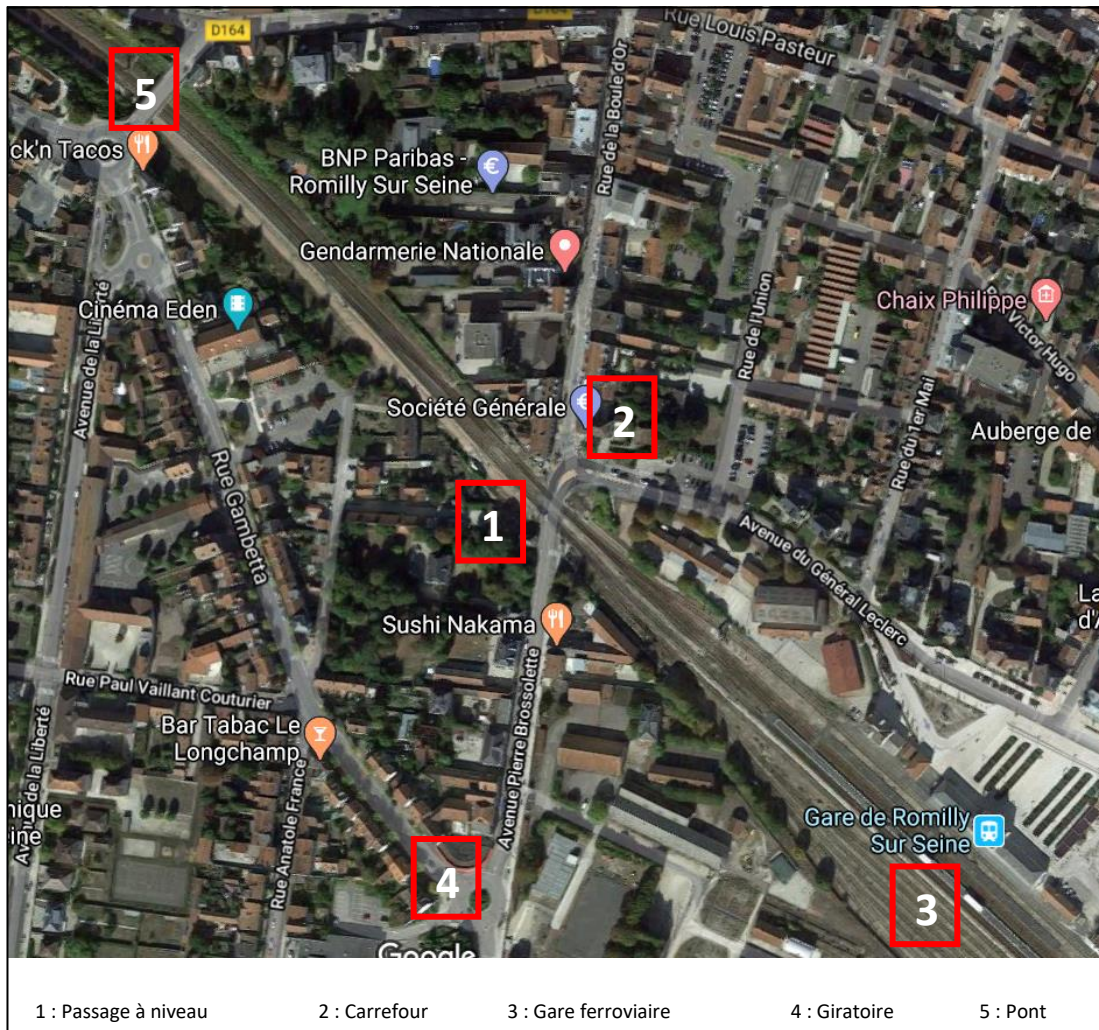


Figure V-3 : Environnement du PN d'intérêt (Source : Google Maps)

5.2. Analyse système

L'analyse système se fait sous trois angles, comme préconisé au chapitre 4 : objets, acteurs, processus.

5.2.1. Décomposition produit

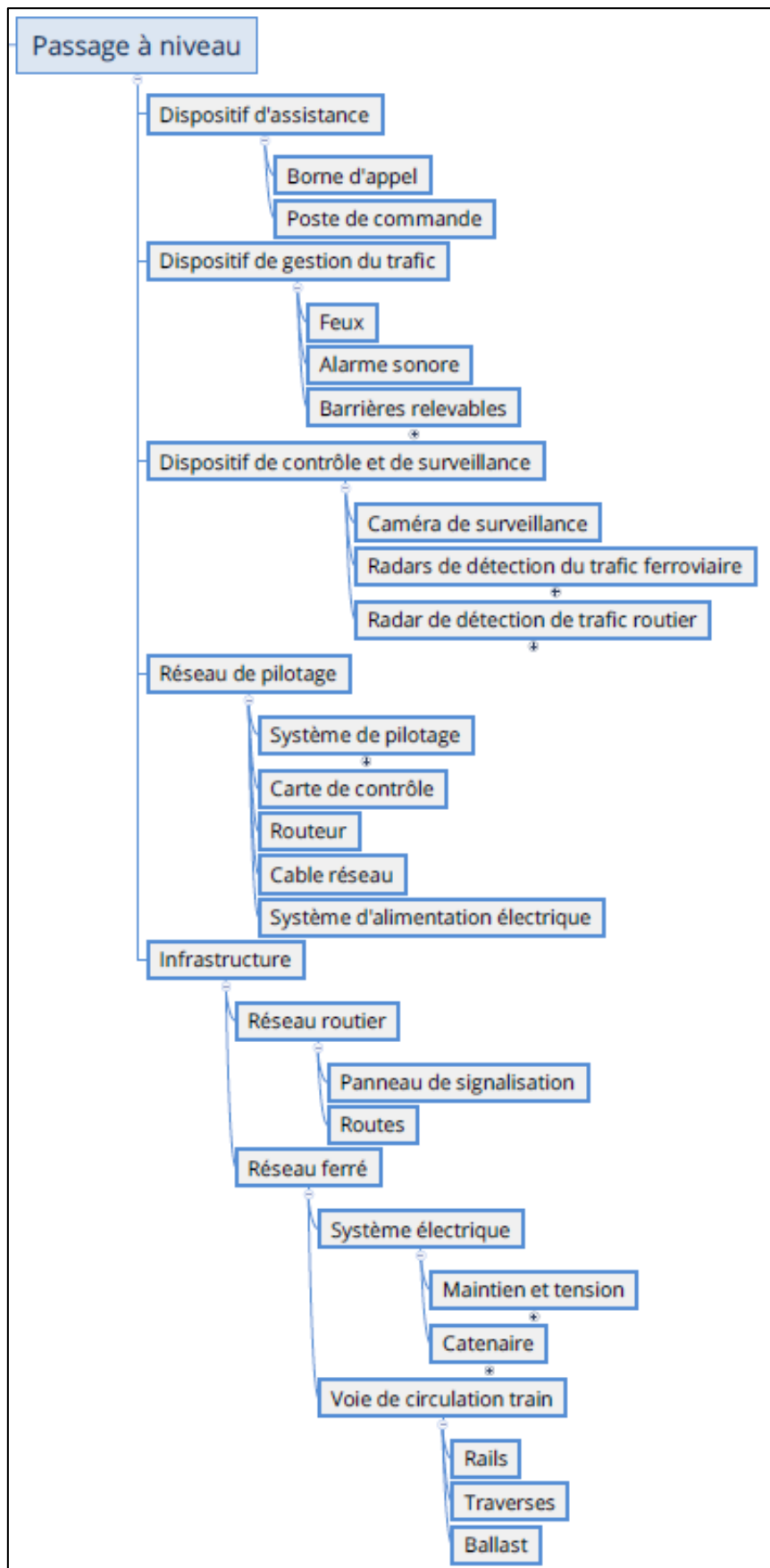


Figure V-4 : Arborescence produit d'un passage à niveau

L'intérêt de cette décomposition produit est qu'elle regroupe et classe les différents composants en fonction de leurs rôles sur le PN : assistance, fonctionnement, surveillance, pilotage. L'assistance regroupe les composants qui sont en contact direct avec des contrôleurs du trafic. Le fonctionnement rassemble les éléments de fonctionnement d'un PN d'un point de vue utilisateur. Quant au dispositif de surveillance, il s'agit des radars et différents éléments de surveillance de trafic. Enfin le réseau de pilotage concerne tous les éléments qui assurent le fonctionnement des composants précédents. La dernière branche, « Infrastructure », concerne les éléments statiques qui composent le réseau routier et le réseau ferré.

5.2.2. Fonctionnement général

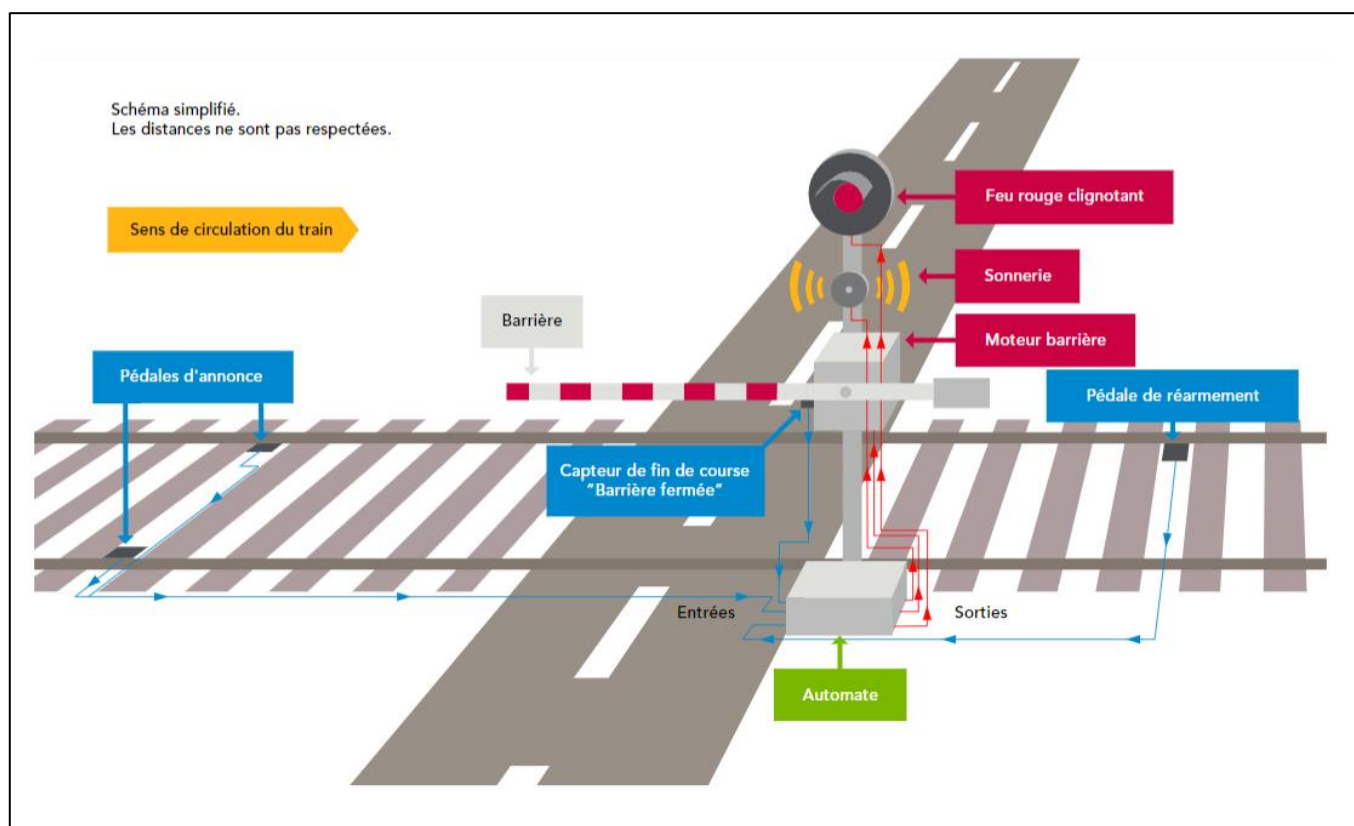


Figure V-5 : Composants du fonctionnement général d'un passage à niveau automatique (Source : [SNCF 2013]).

Le franchissement d'un passage à niveau par un train se traduit par une séquence d'actions, pour la plupart automatiques. Le train franchit d'abord les pédales d'annonce (sous **Radars de détection du trafic ferroviaire**). Ce franchissement entraîne un clignotement des feux rouges ainsi que le retentissement des sonneries. Après quelques secondes d'annonce sonore et lumineuse, les barrières s'abaissent durant environ 8 à 10 secondes. Leur abaissement définitif est synonyme de l'arrêt automatique des sonneries (pour éviter les nuisances sonores). Après les dix secondes qui suivent l'abaissement des barrières, le train passe. Environ 5 se-

condes après le passage de la dernière voiture du train, les feux rouges s'éteignent et les barrières s'ouvrent. A noter qu'un train est annoncé au minimum 25 secondes avant son arrivée au passage à niveau.

5.2.3. Acteurs autour des PN

Il s'agit des acteurs qui par leur rôle et fonction ont le pouvoir ou le droit interagir avec le PN physique, raison pour laquelle le piéton et automobilistes routiers ne sont pas pris en compte dans cette classification. Il s'agit principalement des acteurs liés au domaine ferroviaire et des acteurs liés au domaine routier.

5.2.3.1. Les acteurs du ferroviaire

i. Gestionnaire Ferroviaire - GF (SNCF Réseau)

Il intervient sur le domaine ferroviaire, les équipements de passage et la signalisation de position. Pour les passages à niveau automatiques, il s'agit des feux rouges clignotants, les sonneries, mécanismes et barrières, le platelage ou le revêtement situé sur la voie ferrée, les téléphones situés à proximité qui permettent aux usagers de la route d'aviser les agents du chemin de fer des dérangements ou des accidents. Pour les PN dépourvus de barrières, il s'agit des croix de Saint-André, le stop, les feux rouges clignotants. C'est ce groupe d'acteurs qui a la responsabilité du système Jumeau Numérique. On peut le subdiviser en trois parties :

- **Autorité/Opérateurs de régulation du trafic ferroviaire et routier.** Elle gère toutes les activités liées à la supervision du trafic de trains, donc leur temps d'arrivée, de départ et de passage au niveau d'un PN. Elle agit également sur le trafic routier. Elle peut être associée à un centre de contrôle. Ses actions sur le PN physique peuvent se décliner comme suit :
 - Contrôle des mouvements sur la voie
 - Commande du passage des véhicules
 - Contrôle de l'état du trafic routier
 - Mise en œuvre de la procédure d'arrivée et de départ des trains
 - Commande des mouvements de trains
 - Maintien du bon fonctionnement du système
 - Vérification de l'état des dispositifs

- **Equipe de maintenance.** Pour garantir le bon fonctionnement du PN, elle le gère en amont (les activités de maintenance planifiée, de maintenance d'opportunité et de contrôle) ainsi qu'en aval à travers des modifications mineures ou majeures (pannes, réparations) impactant le PN. Ses activités diverses sur le PN physique :
 - Contrôle des installations (état, conformité)
 - Remplacement des pièces défectueuses

- Réparation des pannes
- Réglages et paramétrages
- Recueil de données en vue d'optimiser le processus productif.

➤ **Bureau d'études.** Sous la responsabilité du gestionnaire ferroviaire, le BE comprend une équipe de conception qui est responsable du design et de sa modification. Le BE peut également être constitué d'une équipe externe, appelée afin d'effectuer des études, notamment des études d'analyse d'impact à la suite d'un incident/accident.

ii. SNCF Gare & Connexions

Cet acteur est pris en compte parce que le PN d'étude se trouve près de la gare SNCF de Romilly/Seine. Sur le terrain, SNCF Gares & Connexions conçoit, aménage et modernise les gares. Il est également chargé de l'entretien et de la rénovation du patrimoine historique des gares. Enfin il vise à améliorer l'expérience des voyageurs en leur garantissant confort, sécurité et information multimodale en temps réel (information récupérée chez leur confrère SNCF Voyageurs). Entité opérationnelle et non pas acteur proprement dit, il a un rôle déterminant dans le trafic et le passage des trains, comme on peut le voir sur la *Figure V-6*.

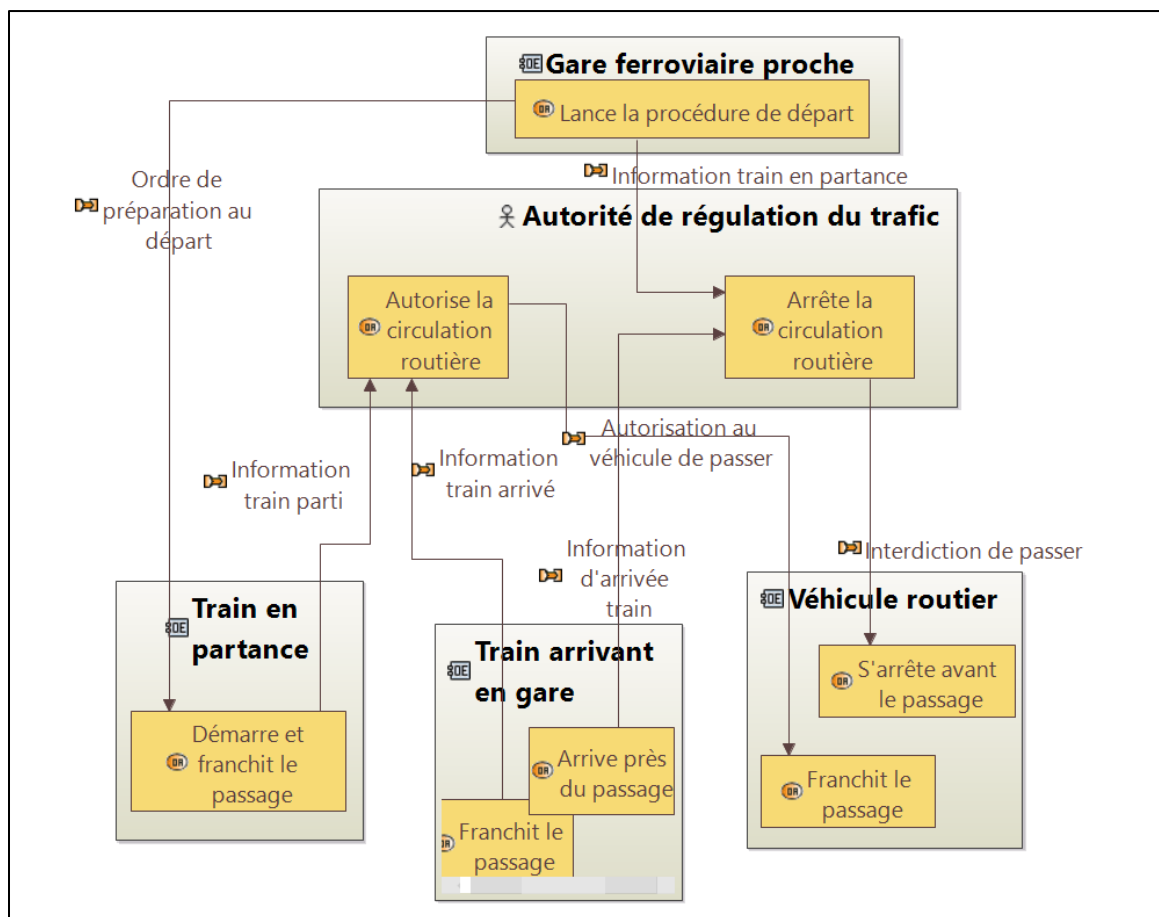


Figure V-6 : Analyse opérationnelle d'une gare ferroviaire proche d'un PN

5.2.3.2. Les acteurs du routier

i. Equipe de maintenance

En charge de la chaussée, marquage, signalisation avancée, ils assurent pour l'automobiliste routier la bonne visibilité sur les équipements du passage à niveau de jour comme de nuit ainsi que la bonne lisibilité lors de l'approche du passage à niveau. En fonction des routes concernées, on peut les décliner en quatre catégories :

- Direction Interdépartementale des Routes (DIR) pour les routes nationales
- Services techniques du Conseil Départemental (CD) pour les routes départementales ;
- Commune pour les voies communales et les chemins ruraux ;
- Établissement Public de Coopération Intercommunale (EPCI) pour les voies intercommunales ou d'intérêt communautaire.

ii. Collectivités territoriales

Les collectivités territoriales ont un rôle primordial dans la prise de décision et le financement des travaux à venir. Se trouve sous leurs responsabilités une entité qui s'occupe de plans d'urbanisation des localités.

5.2.4. Cycle de vie

Le cycle de vie du PN ici est une résultante des exigences données au troisième chapitre de cette thèse, tout en étant adapté à un passage à niveau.

Une phase pré-étude consiste en l'étude de faisabilité du projet, et surtout à la nécessité de créer un nouveau passage à niveau. Une fois validée, les pré-études nous amènent à la phase de conception. Cette phase est celle décrite en [3.3.1](#). Il s'agit du début de la conception détaillée de l'infrastructure. La validation de cette phase nous mène à la construction proprement dite de l'infrastructure. Des anomalies relevées en phase de construction peuvent nous ramener à repasser par la phase de conception afin de prendre en compte ces anomalies et mettre à jour la conception du PN. Après certification et livraison de l'infrastructure à travers un DOE numérique, les exploitants reçoivent l'infrastructure et peuvent lancer des activités de maintenance. Une étape de déconstruction peut s'avérer nécessaire, comme cela a été le cas par exemple du passage à niveau n°1 de Metz la Patrotte [Tout-Metz 2013]

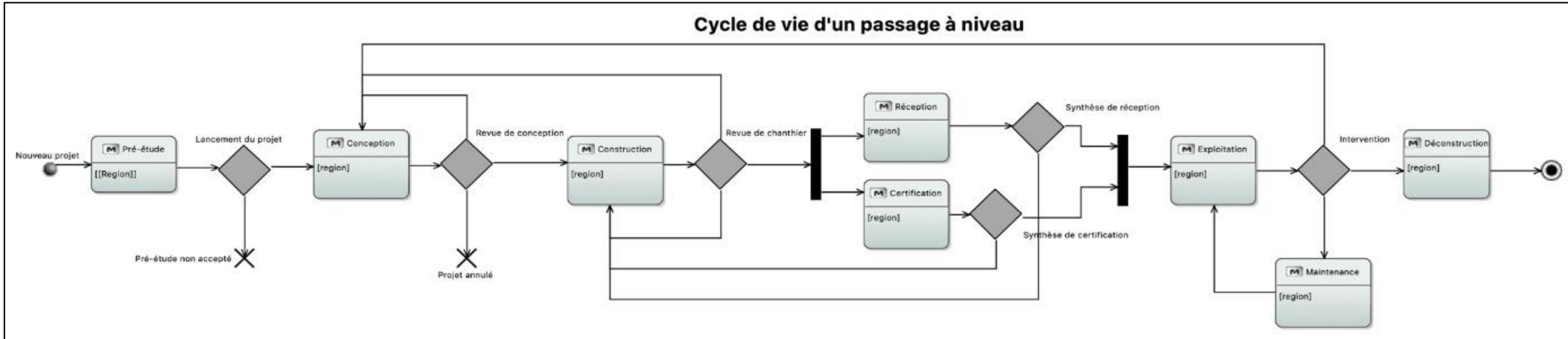


Figure V-7 : Cycle de vie d'un passage à niveau

5.3. Problématique métier : Sécurité

Presque tous les accidents de passage à niveau sont imputables au non-respect des panneaux de signalisation. Cela peut aussi provenir de la façon dont les signes sont indiqués. Un panneau d'information mal placé avant le passage à niveau sur une route courbe est dangereux. Le danger peut également découler de tout travail de construction ou de toute circulation autour des passages à niveau. En fait, tout événement à une certaine distance peut avoir des impacts directs ou indirects sur le système. Comme exemple atypique, on peut citer les véhicules bloqués sur le passage à niveau. L'événement indésirable non planifié peut être dû à un embouteillage, à des feux de signalisation qui ne fonctionnent pas, à une construction quelconque, à une configuration de route ou de rond-point.

5.3.1. Dangers et accidents

Plusieurs causes d'accidents sont à relever au niveau du passage à niveau. Il s'agit principalement des facteurs humains tels que le non-respect de la signalisation routière, l'inattention des automobilistes et/ou des conducteurs de train, l'impossibilité de dégager assez vite, et enfin l'infraction caractérisée à la suite d'un comportement inconscient., et enfin la défaillance du système de sécurité ferroviaire (0,5 à 2% d'accidents sont dus aux défaillances du système de sécurité ferroviaire).

Les 15 405 passages à niveau engendrent environ 30 à 40 morts par an, soit grossièrement 1 % de la mortalité routière. Certains pays comme la Suisse et le Royaume-Uni ont mis en place des politiques résolues pour améliorer la sécurité en prenant en compte les passages à niveau dans leur globalité (par exemple, mise en place d'une équipe de 100 experts au Royaume-Uni, qui compte 5 900 passages à niveau). Si le risque humain est la principale cause d'accidents, il est à noter qu'ils sont souvent dus à un environnement dangereux du passage à niveau. Divers points de vigilance sont à considérer :

- Visibilité de la signalisation réglementaire
- Visibilité du PN par les usagers
- Franchissements difficiles
- Arrêts sur le PN
- Travaux à proximité du PN
- Environnement urbain du PN

5.3.2. Sécurisation et enjeux

Afin de mieux sécuriser les PN, le rapport parlementaire [Gayte 2019] propose des pistes d'amélioration de la sécurisation. Si la suppression systématique par dénivellation d'un passage à niveau peut être une solution, il ne peut pas être un objectif car le coût unitaire d'une suppression est de l'ordre de 10 à 20 millions d'euros.

Ce rapport classe ses propositions en cinq enjeux majeurs :

- Amélioration de l'identification et de la prise en compte des risques
 - Définir des outils et une base de données nationaux, comme par exemple un Système d'Information National des Passages à Niveau (SINPN)
 - Prise en compte de la dangerosité des passages à niveau dans la planification urbaine
 - Réduction des franchissements inutiles de cars scolaires et bus réguliers
- Amélioration de la fiabilité et de l'adaptabilité à la route et au piéton, des mesures de sécurité
 - Fiabilité des équipements de SNCF Réseau et vidéo protection
 - Automatisation des passages à niveau passifs

- Expérimentations et boîte à outils comme un système complémentaire de détection d'obstacle en temps réel, visant à freiner ou à arrêter un train
- Amélioration de la prévention et renforcement des sanctions
 - Augmentation des sanctions à la suite de comportements illicites et dangereux
 - Réduction de la vitesse routière aux abords des passages à niveau
 - Sensibilisation et formation
- Amélioration de l'organisation de la politique de sécurisation
 - Une gouvernance pour des diagnostics obligatoires : évaluation de la dangerosité d'un passage à niveau, pour chaque type de véhicules ainsi que pour les piétons, dans un périmètre de 100 mètres. Plusieurs travaux sont en cours concernant l'évaluation de la dangerosité d'un passage à niveau, notamment le projet MORIPAN [Cazier et al. 2018]
 - Une formalisation de l'INPN
- Réorientation des financements : Un financement priorisé associant davantage les collectivités territoriales. Il s'agit de réorienter les financements de l'Etat et de SNCF Réseau en priorité sur des aménagements plutôt que sur des dénivellations.

5.3.3. Possibilité de mise en place des recommandations

Etablir le jumeau numérique d'un passage à niveau permet ainsi d'avoir une vision globale réelle de notre infrastructure. Ce dispositif numérique pourrait ainsi accompagner les acteurs majeurs du jumeau numérique lors de la prise de décision concernant la mise en application des recommandations. Par ailleurs, les capacités du Jumeau Numérique devraient permettre aux autorités d'évaluer la dangerosité du système ainsi que l'impact des modifications des conditions de circulation dues aux travaux publics. Par conséquent, le jumeau numérique pourrait être utilisé dans le processus de prise de décision. Le problème de sécurité peut être considérablement réduit avec digital twin.

5.4. Spécifications de la maturité du jumeau numérique

Au chapitre 4, nous avons défini une vue préliminaire (*AsDefined*) et quatre vues principales (*AsDesigned*, *AsPlanned*, *AsBuilt*, *InService*).

Le *Tableau V-1* nous donne le contenu des différentes vues tandis que le *Tableau V-2* nous montre les conditions qui font évoluer le cycle de vie du jumeau numérique.

AsDefined	AsDesigned (EBOM)	AsPlanned (MBOM)	AsBuilt	InService
Arborescence Produit Générique	Arborescence Produit spécifiée	Arborescence Produit spécifiée (même structure que le design)	Arborescence Produit spécifiée	Arborescence Produit spécifiée
	Ensemble + Sous-ensembles + Parts	Ensemble + Sous-ensembles + Parts	Ensemble + Sous-ensembles + Parts	Ensemble + Sous-ensembles + Parts
	Parts + Spécifications techniques + Historique	Parts + Spécifications techniques + Historique	Parts + Spécifications techniques + Historique	Parts + Spécifications techniques + Historique
	Parts + Alternates/Substitutes			
	3D BIM	3D BIM	3D BIM	3D BIM
	3D - Part Links	3D - Part Links	3D - Part Links	3D - Part Links
	Documents de conception	Documents de montage & maintenance	Documents de montage & maintenance	Documents de maintenance
	Part - Documents Link	Part - Documents Link	Part - Documents Link	Part - Documents Link
		Vue AsDesigned	Vue AsDesigned & AsPlanned	Vues AsDesigned, AsPlanned & AsBuilt
	Vue SIG	Vue terrain SIG	Vue terrain SIG	Vue terrain SIG
	Change order	Change order		
	Workflow de validation	Workflow de validation	Workflow de validation	
			Lien GMAO	
	Applicabilité	Effectivité	Effectivité	Historique de modifications
		Lien Part - Outillage	Lien Part - Outillage	
		Plan d'exécution (matériel, site, instructions)	Plan exécuté	DOE Numérique
			Ordres de travaux réalisés	
		Information Acheté/Fabriqué	Information Acheté/Fabriqué	
		Instructions exploitation	Instruction Maintenance	
			Planning prévisionnel de maintenance	
		Lien ERP	Lien ERP	
				KPI

Tableau V-1 : Contenu des vues du jumeau numérique

	Actions possibles	Acteurs	Conséquences
AsDefined	Modification arborescence produit	Propriétaire de la solution	Evolution de la version de la solution
	Filtre configuration + Lien avec des données BIM	Responsable SI	AsDefined => AsDesigned
AsDe- signed	Modifications mineures	Gestionnaire ferroviaire (Equipe de conception/maintenance)	Changement d'itération
	Modifications majeures	Gestionnaire ferroviaire (Equipe de conception/maintenance)	Changement de révision
	Validation du design (Prérequis : Connexion SIG)	Gestionnaire ferroviaire + Gare & Connexions + Collectivités territoriales	AsDesigned => AsPlanned
AsPlanned	Modifications mineures	Gestionnaire ferroviaire (Equipe de conception)	Changement d'itération
	Modifications majeures	Gestionnaire ferroviaire (Equipe de conception)	Changement révision + AsPlanned => AsDesigned
	Validation du AsPlanned	Maintenance	Ordre de modifications/travaux envoyé à la maintenance
	Promotion état suivant (Prérequis : Tous les ordres de travaux sont réalisés)	Maintenance	AsPlanned => AsBuilt
AsBuilt	Modifications mineures	Maintenance	AsBuilt => AsPlanned
	Modifications majeures	Maintenance	AsBuilt => AsDesigned
	Connexion du jumeau numérique au PN réel	Responsable SI	
	Validation de l'état (Prérequis : Jumeau numérique connecté au PN réel)	Gestionnaire ferroviaire	AsBuilt => In Service
InService	Modifications valeurs terrain	Maintenance	Changement d'itération
	Activités de maintenance programmée	Maintenance	InService => AsBuilt
	Modifications majeures (Action : Revise)	Gestionnaire ferroviaire	InService => AsDesigned

Tableau V-2 : Typologie des interventions sur le jumeau numérique tout au long du cycle de vie

La Figure V-8 illustre le changement de version d'une vue lors du changement de vues.

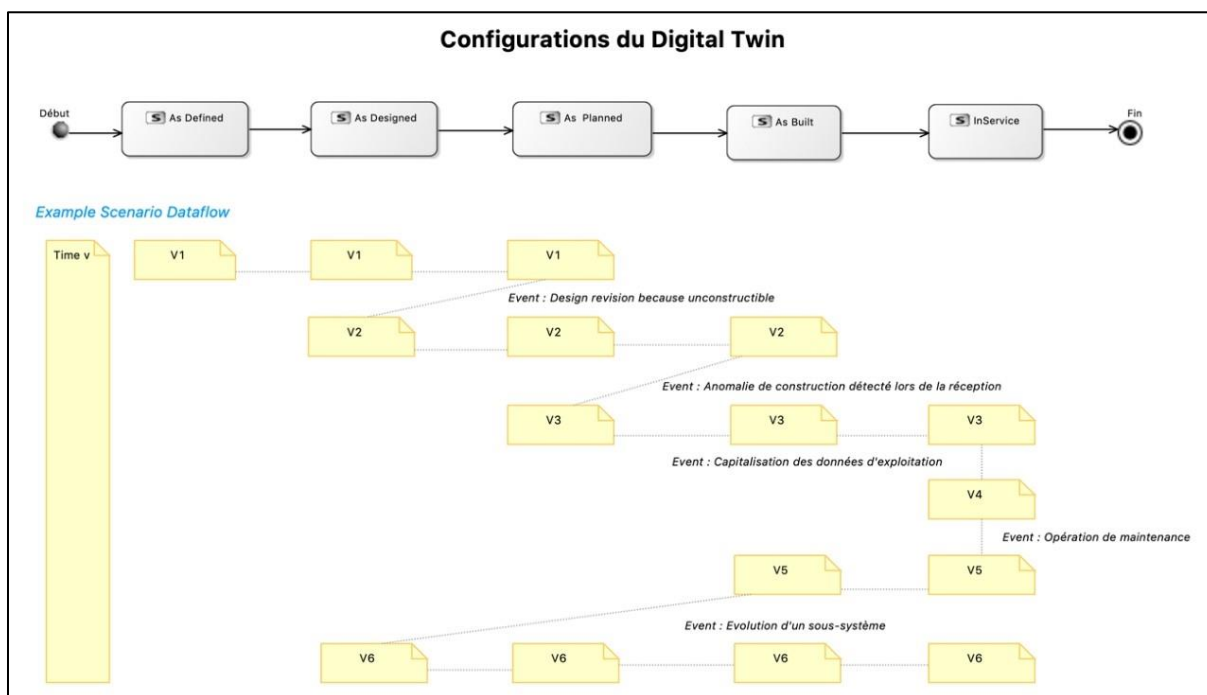


Figure V-8 : Exemple d'évolution des données d'un jumeau numérique

5.5. Scénario global d'évolution de la plateforme jumeau numérique.

Le scénario global représente un ensemble cohérent d'activités que notre plateforme soutiendrait, afin d'assurer la continuité numérique des données depuis la conception jusqu'à l'exploitation et maintenance. Cette continuité numérique permet d'avoir en phase d'exploitation toutes les données de conception de l'infrastructure, et ainsi permettre de modifier le PN et de le faire évoluer, non seulement en fonction des recommandations, mais aussi en fonction de toutes les modifications que l'infrastructure a subies.

La sélection des activités repose sur un cycle de vie classique de l'infrastructure. Il ne s'agit pas des fonctionnalités de la plateforme, mais biens d'activités concrètes réalisées par des acteurs qui interviennent tout au long du processus de gestion de l'infrastructure linéaire, identifiés au point 5.2.3 de ce mémoire. En plus de ces acteurs, nous rajoutons un rôle lié au système d'information, c'est-à-dire à toutes les personnes chargées de mettre en place et maintenir notre système. Dans la suite de ce mémoire, il est désigné « Responsable SI » ou « Resp. SI ».

Les actions/activités évoquées ont un rôle crucial dans la résolution de la problématique de gestion de données dans le temps. La plateforme proposée répond à différents cas d'usages. Utiliser notre plateforme jumeau numérique devrait ainsi créer de la valeur lors de

ces différents usages. Au-delà de l'amélioration de la gestion des données, la création de valeur devra également soutenir la résolution de la problématique principale des passages à niveau, à savoir l'amélioration de la sécurité des usagers. Le scénario global montre également comment les différentes vues du jumeau numérique évoluent dans le temps.

5.5.1. Les activités de conception

Les activités de conception concernent principalement la phase amont du cycle de vie et est sous la responsabilité du bureau d'études. La mission principale à cette étape est de développer la solution initiale ou les modifications majeures du PN. Ceci peut arriver à la suite d'une volonté d'améliorer le PN, ou alors à la suite d'un incident/accident qui demande de repenser la structure du PN. Autre cause possible, modifier temporairement la composition et/ou le fonctionnement d'un PN pour donner suite à des travaux de construction autour du PN. Une fois que le concepteur entame son activité, il peut proposer à une équipe de décision plusieurs alternatives de design.

L'équipe de décision concerne principalement le gestionnaire ferroviaire, tout étant accompagné de plusieurs autorités relatives aux collectivités territoriales qui ont leur opinion dans la conception du PN. Cette équipe de décision a ainsi pour mission de sélectionner une solution parmi les alternatives soumises par l'équipe de conception, tout en sauvegardant les alternatives non sélectionnées. Après la sélection de l'alternative, l'équipe de décision procède à la validation ou non du design, suivant des critères d'ordre social, économique, culturel, etc. Un retour en conception est donc possible si l'alternative n'est pas validée.

5.5.2. Les activités de construction

Ces activités concernent principalement la construction d'un PN à venir ou la modification physique d'un PN réel. Si ces activités concernent le premier cas, il sera question de mettre en application le design qui a été précédemment validée. Les constructeurs devront fidèlement reproduire le design et faire remonter les anomalies ou les incohérences de construction non détectée par la conception.

Dans le cas où ces activités concernent la modification d'un PN réel, Il s'agira d'une activité de maintenance qui demande à repenser la construction du PN. Les acteurs concernés sont l'équipe de travaux de construction et/ou de maintenance. Une fois la construction achevée, c'est le moment opportun d'établir une connexion entre le PN réel et son jumeau numérique.

5.5.3. Les activités d'exploitation et maintenance

Outre les activités classiques de maintenance prévue, il s'agit ici des activités de surveillance et de contrôle. Parmi celles-ci, on peut citer les usages du système qui nous mènent à

anticiper et/ou détecter une panne, ainsi qu'à étudier son impact sur les équipements du même PN ou alors sur d'autres PN.

5.5.4. Scénario global

Les activités propres aux différentes phases du cycle de vie sont regroupées en cas d'usage. A partir de ces cas d'usage, et des différentes vues du jumeau numérique, il a été possible de formaliser ce scénario global en *Figure V-9*.

Rappelons que la démarche concerne un passage à niveau existant.

Le scénario global permet de gérer et suivre l'évolution des différentes vues produit. L'histoire commence avec une équipe de conception qui a réussi à modéliser les données du Jumeau Numérique à la vue *AsDesigned*. Après intégrations des diverses contraintes, il établit une liste de plusieurs alternatives de design. Toutes ces alternatives, sélectionnées ou pas, sont enregistrées. Cet enregistrement permet à l'utilisateur de pouvoir revenir plus tard sur les alternatives qui n'avaient pas été sélectionnées. Outre les capacités de conception, visualisation et simulation, le système permet également d'évaluer les mesures d'amélioration avec un possible retour vers le design. L'évolution des versions de la vue *AsDesigned* permet alors de tracer les modifications de conception.

Une fois une liste d'alternatives soumises, un groupe d'acteurs se concertent pour sélectionner l'alternative à mettre en application. Notre outil permet de discuter ensemble (se concerter, fédérer) et voir toutes les possibilités de construction pour faciliter la prise de décision. Les capacités de task management et de collaboration faciliteront la concertation pour prise de décisions. Pour cela, il est question pour eux de confronter les différentes solutions de design et d'en élire un. Ce groupe concerne les acteurs majeurs ou les représentants des principales parties prenantes. Dans notre cas, il est question du gestionnaire ferroviaire, des Collectivités Territoriales, ainsi que SNCF Gare & Connexions. Si le design est constructible et validé, le jumeau numérique passe alors à la vue *AsPlanned*. Ainsi est établie une liaison entre les données de conception et les données de construction. Si le design de l'infrastructure n'est pas réalisable, il reste en design, et retourne entre les mains de l'équipe de conception, chargée alors de soit proposer de nouveau un ensemble d'alternatives (en se basant sur des versions de design enregistrées mais pas sélectionnées) soit d'affiner le design précédemment choisi par le groupe de validation.

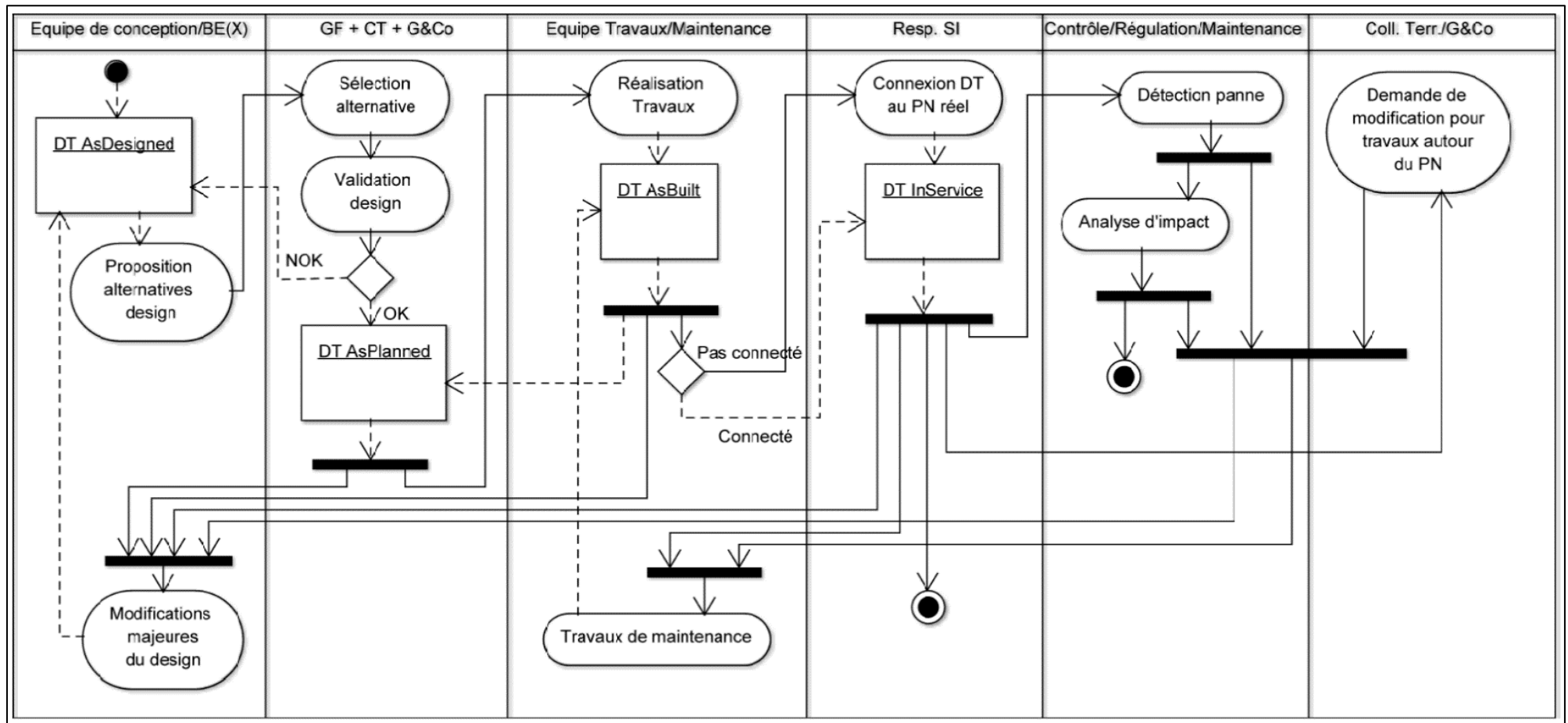


Figure V-9 : Scénario global d'utilisation du jumeau numérique

En cas de modifications majeures du *AsPlanned*, un retour au *AsDesigned* est obligatoire. La validation de la MBOM du *AsPlanned* déclenche l'envoi des ordres de travaux, qui seront exécutés sur le terrain par l'équipe travaux ou de maintenance du gestionnaire ferroviaire. L'exécution des travaux terrain transforme le jumeau numérique à la vue *AsBuilt*. Si l'équipe de travaux ou de maintenance découvre des erreurs, cela implique un changement de vue du jumeau numérique. Si ces erreurs sont liées à la construction, le jumeau numérique passe à la vue *AsPlanned* ou *AsDesigned*. Si les modifications impactent la structure d'ensemble, un retour au *AsDesigned* est obligatoire.

Pour que le jumeau numérique passe à la vue *InService*, il est de la responsabilité d'un digital twin manager (Resp. Si dans la *Figure V-9*) du gestionnaire ferroviaire de s'assurer que le jumeau numérique soit bien connecté au PN à exploiter et maintenir. La vue *InService* est celle qui offre des possibilités d'exploitation et maintenance. En effet, c'est la seule vue où l'infrastructure physique existe et est utilisée. Elle fait foi de l'état actuel du PN avec une visualisation d'un tableau de bords. Elle nous donne une connaissance générale du PN. Ce jumeau numérique fournit un avantage pour la mise en œuvre de tâches de maintenance de routine. En cas de volonté de restructuration du PN, il est nécessaire de repasser par le design. L'utilisateur du jumeau numérique peut ainsi voyager dans le temps à visualiser non seulement une vue actuelle du PN, mais aussi les vues passées et futures. Ce qui permet une meilleure portée des travaux de rénovation. En cas de modifications survenues pour donner suite à des travaux prévus de maintenance, il y a rétrogradation au *AsBuilt*.

A noter qu'il n'y a pas de lien direct entre le *InService* et le *AsPlanned*, mais plutôt un lien indirect, avec un passage soit par la vue *AsDesigned* soit par la vue *AsBuilt*. Aussi, à partir de la vue *InService*, des acteurs liés au centre de contrôle et/ou de régulation de trafic peuvent détecter des pannes et plus loin lancer une analyse d'impact de la panne détectée sur le PN en étude, sur la circulation ferroviaire et/ou routière, et même plus loin l'impact sur d'autres PN. Lorsqu'une panne est détectée, le trafic peut être interrompu (par l'autorité de régulation de trafic) et des informations relatives sont envoyées aux collectivités territoriales. Il y a ainsi remontée d'information et descente de décisions, qui permet une communication globale entre les différents groupes d'acteurs. Une panne détectée peut (si nécessité de faire une correction en fonction de la criticité) impliquer des travaux de maintenance (retour vers le *AsBuilt*) ou alors des modifications majeures (retour vers le *Design*).

Enfin, des travaux de construction autour du PN peuvent avoir des impacts sur la circulation ferroviaire et/ou routière du PN. Pour cette raison, les chantiers environnants le PN doivent limiter l'impact de leur construction sur le PN. Ces acteurs (Collectivités Territoriales, Gare & Connexion) ont ainsi la possibilité d'utiliser le jumeau numérique en vue *InService* pour étudier la faisabilité de leur projet, et s'il y a impact, ils ont la possibilité de soumettre une demande de modification du PN. Cette demande conduit soit à des travaux de maintenance (retour vers le *AsBuilt*) soit à des modifications majeures (retour vers le *Design*).

5.6. Les cas d'usages du scénario global

Notre scénario global peut être découpé en neuf cas d'usages. Le terme « Utilisateur » renvoie aux acteurs concernés par le cas d'usage en question.

5.6.1. UC1 - Proposition alternatives Design

Acteurs : Equipe de conception

Objectifs :

- Modifier le design du digital twin
- Etablir plusieurs versions modifiées

Préconditions :

- L'utilisateur est connecté à la plateforme
- Le concepteur peut modifier les données *AsDesigned* du jumeau numérique en cours d'utilisation
- Les données PLM et BIM sont liées
- L'objet est visualisable dans son environnement

Actions :

- (L'utilisateur reçoit des demandes de modification du design de l'objet)
- L'utilisateur modifie le design ou la position des composants de l'objet
- L'utilisateur enregistre une ou plusieurs alternatives de design
- L'utilisateur valide toutes les alternatives à envoyer à l'équipe de décision

Postconditions :

- Le Gestionnaire Ferroviaire reçoit une assignation à sélectionner une alternative
- Les données *AsDesigned* ne sont pas encore modifiées

Bénéfices :

- Conception, visualisation et simulation du produit et de ses composants
- Simulation des scénarios de fonctionnement, de panne
- Meilleure préparation des opérateurs en cas d'incidents
- Evaluation des mesures d'amélioration lors d'un retour vers la vue *Design*
- Traçabilité de modification

5.6.2. UC2 - Sélection alternative design

Acteurs : Equipe de décision, composée du gestionnaire ferroviaire, des collectivités territoriales, gestionnaire de la gare à proximité

Objectifs : Choisir la conception optimale d'un digital twin parmi toutes les possibilités

Préconditions :

- Les utilisateurs ont reçu une assignation à sélectionner une alternative
- Les utilisateurs ne peuvent pas directement modifier les données de *Design*
- L'objet est visualisable dans son environnement

Actions :

- Les utilisateurs visualisent et simulent toutes les alternatives proposées
- Les utilisateurs peuvent effectuer une modification mineure sur une ou plusieurs alternatives
- Les utilisateurs sauvegardent les modifications
- Les utilisateurs sélectionnent une alternative parmi celles proposées par l'équipe de conception
- L'utilisateur enregistre les alternatives non sélectionnées

Postconditions :

- Une assignation à valider une alternative est envoyée
- Les Données *AsDesigned* ne sont pas encore modifiées

Bénéfices :

- Conception et enregistrement de plusieurs alternatives de design
- Possibilité de revenir sur une alternative non sélectionnée
- Traçabilité des critères de sélections et de leurs évaluations pour chaque alternative (Knowledge data base)

5.6.3. UC3 - Validation d'une alternative

Acteurs : Equipe de décision

Objectifs : Valider le design précédemment sélectionné

Préconditions :

- Les utilisateurs ont reçu une assignation à valider une alternative
- Les utilisateurs ne peuvent pas directement modifier les données de *Design*
- L'objet est visualisable dans son environnement
- Les critères de validation d'une alternative sont définis

Actions :

- Les utilisateurs vérifient que l'alternative sélectionnée respecte tous les critères de validation

Postconditions :

- Si validation OK

- Les données de la vue *AsDesigned* sont modifiées
- La vue est cours devient la vue *AsPlanned*
- Si validation n'est pas OK
 - Assignation à l'équipe de conception de proposer de nouvelles alternatives de design

Bénéfices :

- Ingénierie simultanée
- Aide de prise à la décision

5.6.4. UC4 - Réalisation des travaux

Acteurs : Equipe Travaux/Maintenance

Objectifs : Effectuer sur le PN réel les modifications faites sur le design du digital twin

Préconditions :

- L'utilisateur a reçu une demande d'intervention ou de modification
- La vue en cours d'utilisation du jumeau numérique est la vue *AsPlanned*
- L'objet est visualisable dans son environnement

Actions :

- L'utilisateur simule l'impact de sa modification sur le digital twin
- L'utilisateur valide la faisabilité de la modification demandée
- (L'utilisateur effectue la modification sur le PN réel)
- L'utilisateur remonte toutes les données du terrain dans le jumeau numérique

Postconditions :

- Le digital twin passe en vue *AsBuilt*

Bénéfices :

- Pré-visite virtuelle pour la maintenance à venir
- Anticipation des phases chantiers (simulation de la construction et de la logistique)

5.6.5. UC5 - Connexion de la plateforme Jumeau Numérique au PN

Acteurs : Resp. SI, Gestionnaire ferroviaire

Objectifs : Etablir une connexion entre le digital twin et le PN réel

Préconditions :

- L'utilisateur est connecté à la plateforme
- L'objet est visualisable dans son environnement

- La vue en cours d'utilisation du jumeau numérique est la vue *AsBuilt*

Actions :

- L'utilisateur connecte via un signal de données le digital twin au PN

Postconditions :

- La configuration de la plateforme correspond au PN
- Etat Jumeau Numérique : *InService*
- Certaines données du PN physique sont remontées automatiquement dans le jumeau numérique

Bénéfices :

- Informations en temps réel disponible pour les autres utilisateurs.
- Vues passées, actuelles et futures du jumeau numérique

5.6.6. UC6 - Détection de panne

Acteurs : Centre de contrôle/régulation/maintenance

Objectifs : Déterminer équipements en panne

Préconditions :

- L'utilisateur est connecté à la plateforme
- La plateforme est connectée au PN considéré
- Etat Jumeau Numérique : *InService*

Actions :

- L'utilisateur lance une simulation numérique de fonctionnement du PN et de comportements des équipements et obtient un ensemble de résultats
- Un acteur effectue les tests sur le PN physique en question et obtient un ensemble de résultats
- L'utilisateur remonte les données dans le digital twin
- L'utilisateur compare les résultats et identifie le fonctionnement et/ou l'équipement incohérent
- L'utilisateur intègre les données en écart et met à jour les données du digital twin
- L'utilisateur lance un ordre de réparation

Postconditions :

- Ordre de réparation envoyé aux destinataires spécifiés (acteurs ferroviaires et routiers)
- Etat Jumeau Numérique : *InService*

5.6.7. UC7 - Analyse d'impact des matériels similaires sur d'autres PN

Acteurs : Acteurs ferroviaires

Objectif : Etablir liste de PN potentiellement impactés par une panne

Préconditions :

- Etat Jumeau Numérique : *InService*
- Apparition incident/accident sur le PN
- L'utilisateur est connecté

Actions :

- L'utilisateur fait un état du comportement et des équipements impactés lors de l'incident
- L'utilisateur détermine les pistes de l'accident
- L'utilisateur effectue des tests concernant les différentes pistes
- L'utilisateur conclut sur les causes de l'incident/Accident
- L'utilisateur envoie une demande de test anticipé sur les PN ayant les mêmes caractéristiques et/ou les mêmes équipements.

Postconditions :

- Demande de tests envoyés sur d'autres PN aux acteurs ferroviaires et/ou routiers

Bénéfices :

- Anticipation des incidents/accidents

5.6.8. UC8 - Maintenance du PN

Acteurs : Equipe de maintenance

Objectifs :

- Effectuer sur le PN réel les activités suivant le planning de maintenance
- Maintenance d'opportunités

Préconditions :

- L'utilisateur est connecté
- Etat Jumeau Numérique : *InService*

Actions :

- L'utilisateur simule la maintenance originellement prévue sur le PN
- L'utilisateur détecte les comportements et les équipements impactés par la maintenance, ainsi que l'effet sur la circulation routière
- L'utilisateur intègre également les demandes de réparations envoyées lors du scénario détection de panne

- L'utilisateur émet un programme final de maintenance

Postconditions :

- Les travaux de maintenance débutent sur le PN physique
- La vue en cours devient la vue *AsBuilt*

Bénéfices :

- Rénovation plus facile à mettre en œuvre
- Mise en service simplifiée. Réparations moins ponctuelles (proactives)
- Temps de réalisation des travaux réduit, coûts réduits en raison de l'utilisation efficace de la main-d'œuvre et des ressources
- Meilleure portée des travaux de rénovation.
- Statut de maintenance dans le modèle, valeurs actuelles et l'historique des modifications
- Suivi unitaire des opérations, vue sur l'activité des opérateurs

5.6.9. UC9 - Modification du PN liée à des constructions alentours du passage à niveau

Objectifs : Envoyer une demande de modification du PN

Préconditions :

- L'utilisateur est connecté
- Etat Jumeau Numérique : *InService*

Bénéfices :

- Surveillance continue pour décider des changements futurs, réduction du temps de construction et les coûts.
- Exposition des données de conception et de production aux opérateurs (continuité numérique)
- Remontée d'information et descente de décisions : communication globale entre les acteurs

5.6.9.1. Création d'un nouveau bâtiment

Acteurs : Gestionnaire ferroviaire, Collectivités territoriales

Evénements :

- L'utilisateur positionne géographiquement le nouveau bâtiment à construire
- L'utilisateur simule la phase chantier de la construction du bâtiment
- L'utilisateur planifie des travaux à réaliser

- L'utilisateur analyse les impacts des travaux sur le PN ainsi que les impacts du PN sur l'utilisation du bâtiment
- L'utilisateur étudie et sélectionne l'alternative la plus optimale
- L'utilisateur enregistre momentanément les alternatives non retenues
- L'utilisateur modifie le jumeau numérique
- L'utilisateur envoie les ordres de modification du PN réel.

5.6.9.2. Travaux sur la gare

Acteurs : Gestionnaire ferroviaire et SNCF Gare & Connexions

Evénements :

- L'utilisateur positionne géographiquement la gare à modifier
- L'utilisateur simule les travaux sur la gare
- L'utilisateur planifie des travaux à réaliser
- L'utilisateur analyse les impacts des travaux sur la circulation des trains
- L'utilisateur analyse l'impact de la proximité du PN sur les travaux
- L'utilisateur étudie et sélectionne l'alternative la plus optimale
- L'utilisateur enregistre momentanément les alternatives non retenues
- L'utilisateur modifie le jumeau numérique
- L'utilisateur envoie les ordres de modification du PN réel.

5.6.9.3. Travaux sur un ouvrage d'art

Acteurs : Gestionnaire ferroviaire et Collectivités territoriales

Evénements :

- L'utilisateur positionne géographiquement l'ouvrage à modifier ou à construire
- L'utilisateur simule les travaux de l'ouvrage
- L'utilisateur planifie des travaux à réaliser
- L'utilisateur analyse les impacts des travaux sur la circulation des trains et sur la circulation des véhicules routiers
- L'utilisateur analyse l'impact de la proximité du PN sur les travaux
- L'utilisateur étudie et sélectionne l'alternative la plus optimale
- L'utilisateur enregistre momentanément les alternatives non retenues
- L'utilisateur modifie le jumeau numérique
- L'utilisateur envoie les ordres de modification du PN réel.

Postconditions :

- Etat Jumeau Numérique : *InService*
- Ordre de travaux envoyés aux acteurs du chantier.

5.7. Les process métiers issus du scénario global

Le scénario global peut être découpé en plusieurs process métiers. Ce découpage permet de se focaliser sur des scénarios relatifs à des besoins particuliers. Ainsi nous avons mis avant quatre process métiers :

- Reverse engineering
- Réingénierie des données de conception et construction
- Exploitation et Maintenance
- Analyse et modification de l'existant

5.7.1. Process 0 : Reverse engineering

Ce process est un process préliminaire lorsqu'il vient à s'occuper d'une infrastructure linéaire existant. Son objectif est de reproduire de façon numérique le PN existant. Il est donc question de virtualiser le PN réel et ses composants, reconstituer une partie de la représentation digitale du PN. Plusieurs moyens peuvent être utilisés pour ce faire. Un exemple est le scan de bord de voie du PN. Le gestionnaire ferroviaire est donc responsable pour obtenir un nuage de points 3D de son infrastructure. Ce nuage de point peut être assimilable à une vue *AsBuilt* préliminaire.

5.7.2. Process 0' : Réingénierie des données de conception et construction

Après la numérisation de l'existant, suit une réingénierie des données de conception et de construction. Il s'agit également d'une étape préparatoire. Les objectifs sont de transformer le nuage de points en données CAO exploitables, et d'associer ces données techniques aux composants du PN. Cette conversion peut être réalisée avec des logiciels de conversion CAO. Le résultat est une vue *AsDesigned* du jumeau numérique.

5.7.3. Process d'exploitation et maintenance

La maintenance du produit est primordiale pour garantir le meilleur environnement pour le produit. En fait, un bon entretien permettra au produit de durer longtemps et dans le meilleur état possible. La Réalité Augmentée permet des expériences beaucoup plus intéressantes. L'enjeu est d'augmenter au maximum le taux de disponibilité de l'infrastructure. Les objectifs sont d'améliorer l'efficacité des activités d'exploitation et de maintenance du PN, et d'améliorer la maintenance des équipements en réalisant plus de tâches à distance.

Ce process suit respectivement les UC4 – UC5 - UC6 – UC7 – UC8 à savoir :

- UC4 – Réalisation des travaux
- UC5 – Connexion du jumeau numérique au passage à niveau
- UC6 – Détection de panne

- UC7 – Analyse d’impacts
- UC8 – Maintenance du PN

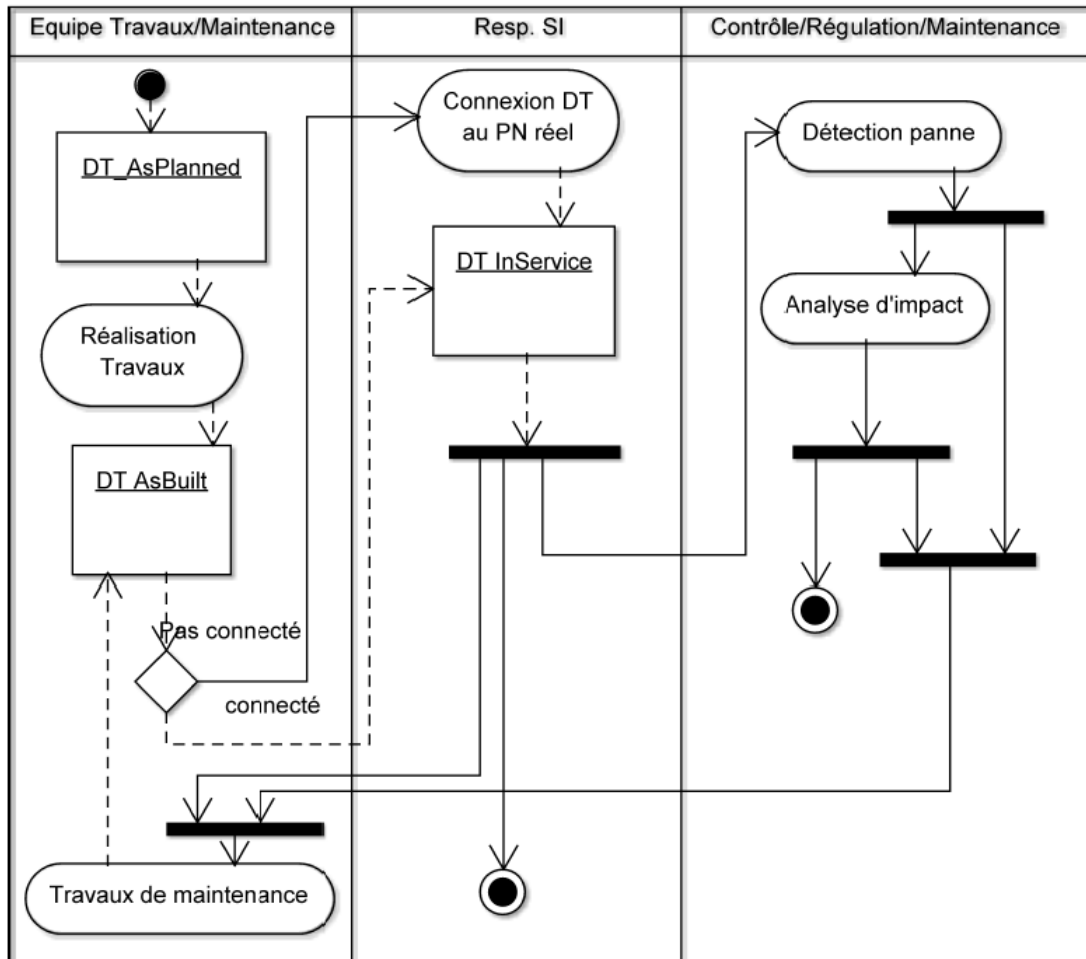


Figure V-10 : Illustration du process d’exploitation et maintenance

Les responsables de ce processus sont le gestionnaire ferroviaire et l’équipe de maintenance qui cherche à réparer/déboguer son équipement. Les opérateurs de maintenance peuvent être frustrés à la suite de modifications possibles numériquement mais pas physiquement. Il s’agit donc pour eux de prévisualiser les composants du produit ainsi que les données de diagnostic sans contraintes de dispositif AR / VR. Ceci peut se faire à travers des fonctionnalités collaboration par « glisser-déposer » telles que des annotations ou des pointeurs virtuels. Il en ressort un gain de temps. En effet, le temps consacré à la détection de panne permet de réduire le temps de réparation des défauts. En sortie du processus, nous avons le jumeau numérique à jour (vue *InService*).

5.7.4. Process d'analyse et modification de l'existant

Il s'agit de toutes les activités qui sortent du cadre d'exploitation et maintenance. Il peut s'agir des activités de déconstruction du PN par exemple. Plusieurs objectifs découlent de ce process. Une collaboration autour d'un modèle 3D à grande échelle réduit les erreurs de conception et crée un produit répondant plus rapidement et mieux aux attentes de l'équipe interne et des clients, sans recréer le produit physique à chaque étape. Il est donc intéressant de choisir la conception optimale d'un digital twin parmi toutes les possibilités. Ensuite, il faut transcrire ce qui a été conceptualisé précédemment dans le système. Enfin, l'équipe de décision arbitre entre les différents choix de conception. Ce process suit respectivement les UC9 - UC1 - UC2 - UC3 - UC4 - UC5 à savoir :

- UC9 – Demande de modification du PN liée à des constructions autour du PN
- UC1 – Proposition alternatives design
- UC2 – Sélection alternative design
- UC3 – Validation alternative
- UC4 – Réalisation des travaux
- UC5 – Connexion du jumeau numérique au passage à niveau

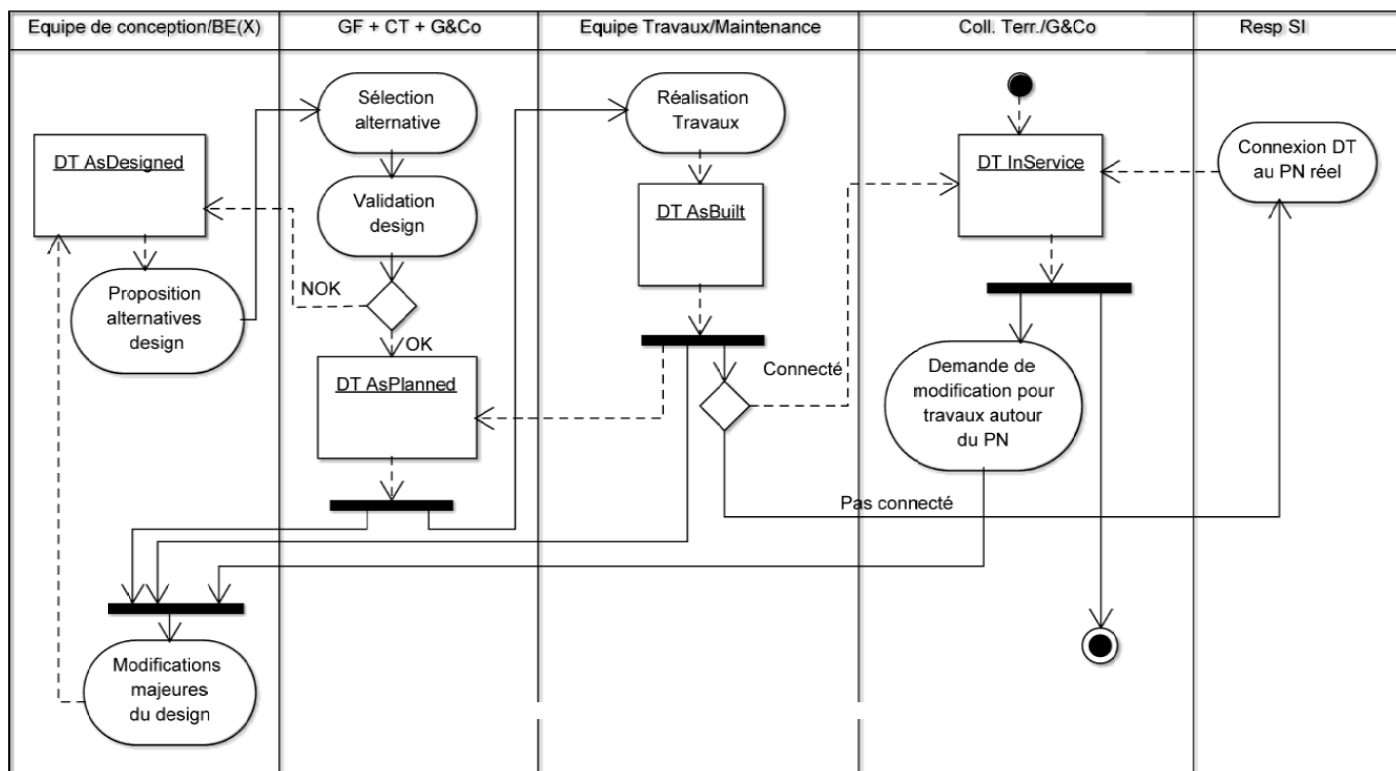


Figure V-11 : Process d'Analyse et Modification de l'existant

Les bénéfices apportés par notre jumeau numérique dans ce process sont :

- Collaboration autour de la conception d'un produit
 - o Accélération du cycle de développement et de planification
 - o Gain de temps dans les choix de conception, révision
- Aspect collaboratif de la revue de conception avec des boucles retour vers le design
- Modification facile des environnements 3D en fonction des besoins des utilisateurs
- Meilleure collaboration entre les différents métiers
- Mises à jour des informations produit (connexion PLM)
- Pas de rupture dans la continuité numérique des données.

La mise en place et l'utilisation de notre proposition de jumeau numérique permet ainsi d'améliorer la collaboration entre différents métiers en phase d'exploitation et maintenance, tout en assurant la continuité des données. Les process métiers évoqués sont des illustrations de ce qui peut se faire en réalité. La liste n'est pas exhaustive. Le déroulement virtuel successif de tous les process métiers permettra d'enrichir le jumeau numérique et le rendre plus intelligent, comme précisé au [4.5.3.2](#).

Conclusion

Si le troisième chapitre de cette thèse définit les exigences d'une gestion de cycle de vie d'une infrastructure linéaire, le quatrième quant à lui propose un système de jumeau numérique, qui supporte ce cycle de vie. Dans ce cinquième chapitre, il a été question de mettre en application ce système sur une intersection d'une infrastructure routière et d'une infrastructure ferroviaire : c'est le passage à niveau. La principale problématique d'un tel nœud est la sécurité des usagers. Bien que les usagers des passages à niveau soient les principaux responsables des accidents, la responsabilité de l'exploitant/mainteneur, ou même de l'Etat peut être mise en cause. Il existe donc un fort intérêt pour ces acteurs de déployer les moyens pour améliorer la sécurité des usagers lors de leur passage. Un rapport parlementaire propose des pistes d'amélioration de la sécurisation.

Notre système jumeau numérique proposé pourrait être utilisé comme un outil de support qui devrait accompagner la mise en place des recommandations faites pour la sécurisation d'un passage à niveau. Dans ce chapitre, nous avons montré que ce jumeau numérique pourrait supporter non seulement les activités usuelles d'exploitation et maintenance, mais aussi celles liés à l'analyse et à la modification de l'existant. Outre ces possibilités, notre proposition de jumeau numérique établit une liaison entre différentes vues de données. En effet, l'enchaînement des cas d'usages d'utilisation du jumeau numérique a permis d'effectuer des boucles entre les données de conception, les données d'exploitation et les données de maintenance.

Conclusion Générale & Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

Contenu et apports de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans une approche conceptuelle et méthodologique des services du numérique appliqués au domaine de la construction en général, et celui des infrastructures linéaires en particulier, qui constitue notre domaine d'intérêt. Cette thèse étudie les moyens à mettre en place afin d'améliorer la gestion de cycle de vie de telles infrastructures.

Partant de la croissance de la gestion du cycle de vie (ou Product Lifecycle Management – PLM) au sein de l'industrie manufacturière, les premières curiosités de ces travaux se sont tournées vers l'avènement du numérique dans le secteur de la construction, à travers le Building Information Modeling. Deux points ont été rapidement constatés. Le premier est le fait que l'utilisation du BIM s'avère plus avancée dans le domaine du bâtiment que dans celui des infrastructures linéaires. Le deuxième point est que, contrairement au PLM, le BIM ne porte pas un fort intérêt à gérer la donnée tout au long du cycle d'un ouvrage. Il se concentre principalement sur les données et modèles de conception. De ces points, est né l'intérêt de cette thèse, à savoir développer une stratégie pour gérer tout le cycle de vie d'une infrastructure linéaire. La gestion des infrastructures linéaires implique de multiples exigences en termes de gestion de données. Ces besoins sont partiellement couverts par les initiatives PLM et BIM. C'est la raison pour laquelle les réflexions nous mènent d'abord à étudier un usage complémentaire du BIM et du PLM. Cet usage nous conduit vers une proposition de jumeau numérique.

Il est sans doute opportun de rappeler ses apports pour notre domaine d'intérêt. Notre jumeau numérique est positionné comme visualiseur et agrégateur de données issues de différents systèmes d'information. Le principal intérêt d'une telle approche est qu'elle évite la duplication des données, ainsi que la perte de leur référence. Elle permet ainsi d'éviter le risque de désynchronisation de l'information. Epruvé sur un cas d'usage métier relatif à un passage à niveau, cet agrégateur numérique prend en compte les besoins spécifiques d'une infrastructure industrielle linéaire. En couvrant les phases de représentation, de structuration et de gestion d'informations de l'infrastructure dans un environnement hétérogène multi-vues, il assure de fait la continuité numérique du projet. Ces travaux proposent également une méthodologie pour la mise en place d'un tel ensemble de systèmes. L'enrichissement et la mise à jour du jumeau numérique sont faits à travers des cas d'usages métiers. Cette méthodologie à travers les cas d'usages démontre qu'un jumeau numérique n'a pas forcément vocation à représenter toute la réalité d'une infrastructure linéaire, mais uniquement les éléments essentiels qui peuvent impacter une prise de décisions.

Limites

Ces travaux de thèse n'ont pas vocation à définir ni à prendre en compte tous les aspects d'un projet de construction d'infrastructure linéaire. Un cadre a été défini dès le départ du projet et le choix a été fait de se focaliser sur un passage à niveau, existant. Cette décision, bien que motivée, nous conduits à deux limites.

La première limite vient du choix du passage à niveau. Ce n'est pas une infrastructure linéaire proprement dite, mais une intersection de deux infrastructures. Bien que notre système puisse être applicable à la gestion d'un passage à niveau, cette proposition de thèse mérite d'être confrontée à d'autres types d'infrastructures linéaires. Nous avons pris en compte cette pluralité d'infrastructures en proposant une solution, un modèle de jumeau numérique générique, instanciable en fonction du type d'infrastructure considérée. Pour valider le système proposé, les travaux futurs devraient se tourner vers l'applicabilité du modèle sur un ou plusieurs autres types d'infrastructure linéaire.

La deuxième limite concerne l'existence de l'infrastructure linéaire qui constitue le cas d'usage. En effet, l'infrastructure considérée dans ces travaux existe déjà. Si nous avons pu obtenir un nuage de points de l'infrastructure, il s'est avéré plus difficile d'obtenir les données de conception. Qu'en est-il des infrastructures linéaires à construire, c'est-à-dire non existantes ? Est-ce que le système ou la méthodologie proposée pourrait être applicable ? Répondre à ces interrogations nécessiterait de pouvoir intégrer un projet de construction et proposer une plateforme du système. Deux process ont été mis en avant dans le cinquième chapitre : l'exploitation et maintenance, ainsi que l'analyse et modification de l'existant. Ces deux process n'intègrent pas toutes les processus d'étude de faisabilité de projet, ni de conception, menés en amont d'un projet d'infrastructure à construire. Pour que ce jumeau numérique puisse y être défini dès le début du projet, il faut qu'il soit enrichi. Définir et construire notre jumeau numérique dès la phase de conception pourrait mettre en valeur une de ses plus-values. En effet, même après plusieurs années, les futurs exploitants et mainteneurs seront capables de restituer les données de conception et de construction, afin d'assurer la pérennité des données sensibles. Cette pérennité de données s'avère intéressante lorsqu'il vient à gérer des infrastructures sensibles comme des tunnels d'enfouissement des déchets nucléaires.

La principale limitation technique vient de l'absence d'une démonstration technique du système proposé. Pour contourner cette limitation, nous avons établi une application basée sur des cas d'usages. Mettre en place une solution technique demande un effort considérable de développement et/ou déploiement logiciel. Des futurs travaux devront se concentrer pour installer un tel système. Cette implémentation technique était initialement programmée avant la fin de cette thèse, à travers une plateforme de démonstration. Nous avons même déjà défini une approche de mise en œuvre du démonstrateur :

- Définition des objectifs & hypothèses : Les travaux réalisés pendant la durée de la thèse ont permis de formuler des hypothèses. Sur la base de ces hypothèses, ont été définis le cadre du démonstrateur et ses objectifs.
- Définition du scénario de démonstration : Formalisation d'un scénario qui permet de mettre en évidence des résultats attendus au travers d'activités métier et l'usage d'une solution digital twin.
- Identification des fonctions nécessaires à l'exécution du scénario : Analyse scénario pour identifier les fonctions outils nécessaires pour supporter l'activité. On cartographie toutes ces fonctions.
- Sélection des composants cibles du démonstrateur : Suivant la décomposition fonctionnelle nécessaire, on identifie les architectures organiques possibles suivant les couvertures proposées par les outils du marché.

Par ailleurs, un jumeau numérique est en cours de développement au sein des équipes de Inetum.

Perspectives

Le domaine de la construction est assez ouvert en termes techniques. En effet, ses ramifications peuvent nous conduire à des sujets divers comme la consommation énergétique, l'économie de la construction, les techniques de construction, la réalité virtuelle/augmentée, le Lean construction, etc. Afin de ne pas se perdre à travers ces sujets et leurs interactions, des hypothèses de travail ont été fixées au début des réflexions. Ces hypothèses sont sans doute liées à l'expérience de Inetum en tant qu'intégrateur de solutions PLM. Bien que les infrastructures linéaires soient différentes des produits manufacturés, la logique d'ingénierie appliquée dans ces travaux est proposée sous un prisme d'ingénierie produit. Il serait intéressant d'attaquer le sujet des infrastructures linéaires sous d'autres perspectives. Les projets d'exploitation et maintenance des infrastructures linéaires existantes sont plus nombreux que les projets de construction à venir. Des acteurs de l'exploitation peuvent avoir des besoins différents de ceux d'une ingénierie produit. Ainsi, le système d'infrastructure pris sous un point de vue usages propose une perspective qui peut être intéressante.

Aussi, vu l'engouement suscité par le PLM lorsque ses notions sont appliquées au domaine de la construction, il vient à s'interroger sur la réelle pérennité du PLM. En effet, le BIM est souvent considéré comme le PLM du bâtiment. Même si la méthodologie BIM n'est pas forcément appliquée sur tout projet de construction, les outils BIM quant à eux sont bien existants, et sont pour certains déjà utilisés sur des projets d'infrastructure linéaire. La principale problématique d'interopérabilité est adressée par le développement des standards IFC. Toutes

les infrastructures linéaires seront définies à travers l'IFC5. La publication de cette future version de l'IFC pourrait régler la problématique de continuité numérique des données. Ainsi, avec une plateforme BIM centralisée, et sa connexion interfacée avec d'autres systèmes, aurions-nous encore besoin de définir un « jumeau numérique » de l'infrastructure ? Même si le jumeau numérique proposé dans cette thèse peut être mis en place dès la phase de conception, le jumeau numérique dans ces phases ne consiste qu'en une maquette numérique. Quand on sait que l'essence du jumeau numérique se fait à partir de l'existence d'un jumeau physique, on peut s'interroger quant à l'interaction maquette numérique et jumeau numérique : le jumeau n'est-il pas une extension d'une maquette numérique en phase d'usages (exploitation et maintenance) ?

Concept récent au sein d'un monde industriel compétitif, le jumeau numérique n'a pas encore justifié tout son potentiel. Pilier de l'industrie 4.0, il révèle un intérêt croissant auprès de différents industriels. Plusieurs opportunités de recherche se dégagent. L'une d'entre elles consiste à définir l'écosystème technique associé à l'environnement proposé dans cette thèse. Celle-ci s'est avérée conceptuelle et méthodologique, sans proposer une architecture technique du système d'information. Cette définition technique devrait alors faciliter l'implémentation du jumeau numérique à la fois pour des infrastructures existantes et pour des infrastructures à construire. Plus loin, l'intégration croissante des techniques nouvelles telles que l'Intelligence Artificielle (IA), IoT et Big Data nous conduit de plus en plus vers des jumeaux numériques prédictifs, intelligents et de plus en plus réactifs en temps réel. Les futurs usages sont les jumeaux numériques cognitifs et les jumeaux numériques autonomes. Les premiers sont appelés à fournir à l'utilisateur une aide à la décision élaborée. Les deuxièmes, quant à eux, sont appelés à prendre eux-mêmes des décisions, à appliquer des contrôles à l'objet réel et à évoluer vers de nouveaux usages. Un jumeau numérique autonome apparaît alors comme un moyen de réduire l'impact de l'erreur des utilisateurs lors du franchissement d'un passage à niveau.

Le BIM est une notion assez récente, pas encore mature comparée au PLM. Cette thèse propose une combinaison des deux notions au travers d'un jumeau numérique, afin de gérer le cycle de vie d'une infrastructure. Elle ne peut malheureusement pas couvrir toutes les pistes de réflexions. Le point à retenir, pour Inetum PLM (intégré à Inetum Industries 4.0), est qu'elle a tout intérêt à s'intéresser davantage au domaine de la construction et notamment celui des infrastructures. Grâce à son expertise dans les services du numérique et sa connaissance métier acquise au sein du projet MINND, elle dispose d'une connaissance conséquente pour mieux s'intégrer au domaine.

Bibliographie

- ABANDA, F.H., VIDALAKIS, C., OTI, A.H., AND TAH, J.H.M. 2015. A critical analysis of Building Information Modelling systems used in construction projects. *Advances in Engineering Software* 90, 183–201.
- ABBONDATI, F., BIANCARDO, S.A., PALAZZO, S., CAPALDO, F.S., AND VISCIONE, N. 2020. I-BIM for existing airport infrastructures. *Transportation Research Procedia* 45, 596–603.
- ABDELHAK, B. 2013. La complémentarité entre le Building Information Modeling (BIM) et le Product LifeCycle Management (PLM) en passant par le Lean Construction (LC).
- ABRAMOVICI, M. 2007. Future Trends in Product Lifecycle Management (PLM). *The Future of Product Development*, Springer, 665–674.
- ADEME. 2019. Les enjeux de l'écoconception, les bénéfices pour l'entreprise, pour l'économie et l'environnement. *ADEME*. <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/organiser-demarche-environnementale/dossier/ecoconcevoir-produits/enjeux-lecoconception-benefices-lentreprise-leconomie-lenvironnement>.
- AMANN, J., BORRMANN, A., HEGEMANN, F., ET AL. 2013. *A Refined Product Model for Shield Tunnels Based on a Generalized Approach for Alignment Representation*. .
- ARAM, S. AND EASTMAN, C. 2013. Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry. *ISARC Proceedings*, 1046–1055.
- ARAYICI, Y., COATES, P., KOSKELA, L., KAGIOGLOU, M., USHER, C., AND O'REILLY, K. 2011. BIM adoption and implementation for architectural practices. *Structural Survey* 29, 1, 7–25.
- ARLYNK. 2019. Le BIM en phase d'exécution (partie 2). *Arlynk*. <https://www.arlynk.com/le-bim-en-phase-dexecution-partie-2/>.
- ASHCRAFT, H.W. 2008. Building Information Modeling: A Framework for Collaboration. *Construction Lawyer* 28, 5.
- ASSYSTEM. 2018. Études de conception et BIM pour un ensemble de quartiers généraux. *Assystem*. <https://www.assystem.com/fr/projets/etudes-de-conception-et-bim-pour-un-ensemble-de-quartiers-generaux-securises/>.
- ATLANCAD. 2019. Le BIM en EXE ou le BIM sur le chantier. *AtlanCAD*. <https://www.atlanCAD.fr/bim-consulting/le-bim-en-exe-ou-le-bim-sur-le-chantier/>.
- AUTODESK. 2020. Fonctionnalités de Revit | Fonctionnalités du logiciel de BIM Revit | Autodesk. <https://www.autodesk.fr/products/revit/features>.
- BARISON, M.B. AND SANTOS, E.T. 2010. An overview of BIM specialists. *iccbe 2010 Nottingham University Press Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. <https://docplayer.net/21832035-An-overview-of-bim-specialists.html>.

- BARNES, M. 1988. Construction project management. *International Journal of Project Management* 6, 2, 69–79.
- BAUDRY, B. 2006. 6. *L'impact des nouvelles relations de quasi-intégration sur la gestion de l'emploi des fournisseurs : la question des frontières de la firme*. La Découverte.
- BEACH, T., RANA, O., REZGUI, Y., AND PARASHAR, M. 2015. Governance Model for Cloud Computing in Building Information Management. *IEEE Transactions on Services Computing* 8, 2, 314–327.
- BÉCUE, M., BELIN, J., AND TALBOT, D. 2014. Rente relationnelle et sous-performance des firmes pivots dans la chaîne de valeur aéronautique. *M@n@gement Vol. 17, 2*, 110–135.
- BENSALAH, M., ELOUADI, A., AND MHARZI, H. 2018. BIM - Technological development and software tools to integrate railway libraries, special & normative constraints of large linear projects. *5th European Conference JOIN-TRANS 2018 on Joining and Construction of Rail Vehicles*, 68–73.
- BIANCARDO, S.A., CAPANO, A., DE OLIVEIRA, S.G., AND TIBAUT, A. 2020a. Integration of BIM and Procedural Modeling Tools for Road Design. *Infrastructures* 5, 4, 37.
- BIANCARDO, S.A., VISCIONE, N., ORETO, C., VEROPALUMBO, R., AND ABBONDATI, F. 2020b. BIM Approach for Modeling Airports Terminal Expansion. *Infrastructures* 5, 5, 41.
- BIM BLOG LUXEMBOURG. 2015. BIM Level 2 Deliverables. *BIM Blog Luxembourg*. <https://www.bimblog.lu/bim-level-2/>.
- BISSAY, A., PERNELLE, P., LEFEBVRE, A., AND BOURAS, A. 2008. Approche de capitalisation des connaissances au sein des systèmes PLM. *SIL'08*, 9.
- BODEA, C.-N. AND PURNUS, A. 2018. Legal implications of adopting Building Information Modeling (BIM). *Juridical Tribune (Tribuna Juridica)* 8, 1, 63–72.
- BORRMANN, A. AND JUBIERRE, J. 2013. A Multi-Scale Tunnel Product Model Providing Coherent Geometry and Semantics. 291–298.
- BOTON, C. 2013. Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749337>.
- BOTON, C. AND FORGUES, D. 2017. The Need for a New Systemic Approach to Study Collaboration in the Construction Industry. *Procedia Engineering* 196, 1043–1050.
- BOTON, C. AND FORGUES, D. 2018. Comprendre l'impact du numérique sur la gestion de projet en construction. *Lien social et Politiques* 81, 41–60.
- BOTON, C., RIVEST, L., FORGUES, D., AND JUPP, J. 2016. Comparing PLM and BIM from the Product Structure Standpoint. In: R. Harik, L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard and A. Bouras, eds., *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*. Springer International Publishing, Cham, 443–453.

- BOZONNET, E., JOLAS, C., AND LE DREAU, J. 2018. BIM et conception intégrée - Interopérabilité et optimisation de la performance environnementale. *Les Techniques de l'Ingénieur*.
- BRADLEY, A., LI, H., LARK, R., AND DUNN, S. 2016. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction* 71, 139–152.
- CARMONA, J. AND IRWIN, K. 2007. BIM: who, what, how and why. *Facilitiesnet*. <https://www.facilitiesnet.com/software/article/BIM-who-what-how-and-why--7546>.
- CAZIER, O., LIANG, C., AND GHAZEL, M. 2018. Le projet MORIPAN “ Modèle de Risque au Passage à Niveau .” *Revue Générale des Chemins de Fer (RGCF)* 281, 9p.
- CHAUDET, B., PATRASCU, M., AND BOUILLON, J.-L. 2016. La maquette numérique dans le secteur du bâtiment. *Revue française des sciences de l'information et de la communication* 9.
- CHELSON, D.E. 2010. The Effects of Building Information Modeling on Construction Site Productivity. .
- CHEN, F. 2018. Application of BIM in construction management of railway tunnel by virtual technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 153, 042012.
- CHEN, L., SHI, P., TANG, Q., LIU, W., AND WU, Q. 2020. Development and application of a specification-compliant highway tunnel facility management system based on BIM. *Tunnelling and Underground Space Technology* 97, 103262.
- CHEUTET, V., SEKHARI, A., AND CORBEAUX, N. 2018. PLM and BIM approach to support information management in nuclear decommissioning: a synthesis. *15th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM)*.
- CHINESTA, F., CUETO, E., ABISSET-CHAVANNE, E., DUVAL, J.L., AND KHALDI, F.E. 2018. Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data. *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- COMMUNIC. 2012. *Livrables : L1 - Modèle global*. .
- DARSES, F., DETIENNE, F., AND VISSER, W. 2004. *33. Les activités de conception et leur assistance*. Presses Universitaires de France.
- DAVE, B., BODDY, S., AND KOSKELA, L. 2013. Challenges and Opportunities in Implementing Lean and BIM on an Infrastructure Project. 741–750.
- DAVIES, K., WILKINSON, S., AND MCMEEL, D. 2017. A review of specialist role definitions in BIM guides and standards. .
- DAVIES, R. AND HARTY, C. 2013. Implementing “Site BIM”: A case study of ICT innovation on a large hospital project. *Automation in Construction* 30, 15–24.
- DESPRAT, C., LUGA, H., AND JESSEL, J.-P. 2015. Hybrid client-server and P2P network for web-based collaborative 3D design. *WSCG Digital Library*, 229–238.

- DONG, B., O'NEILL, Z., AND LI, Z. 2014. A BIM-enabled information infrastructure for building energy Fault Detection and Diagnostics. *Automation in Construction* 44, 197–211.
- DUIGOU, J.L. 2010. Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue. Application aux PME mécaniciennes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00487196>.
- DURUPT, A., REMY, S., DUCCELLIER, G., AND POUILLE, P. 2014. Reverse engineering using a knowledge-based approach. *International Journal of Product Development* 19, 1–3, 113–129.
- EASTMAN, C.M., EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., AND LISTON, K. 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- ECKERT, C. AND BOUJUT, J.-F. 2003. The Role of Objects in Design Co-Operation: Communication through Physical or Virtual Objects. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 12, 2, 145–151.
- ESLAHI, M., EL MEOUCHE, R., DOUKARI, O., AND RUAS, A. 2020. BIM and Contribution to IFC-Bridge Development: Application on Raymond Barre Bridge. *Advances in Building Information Modeling*, Springer International Publishing, 182–194.
- FAY, R., TRELOAR, G., AND IYER-RANIGA, U. 2000. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information* 28, 1, 31–41.
- FFB. 2018. *Bilan 2018 et prévisions 2019*. .
- FNTF. 2019. *Recueil de statistiques 2018 | FNTF*. .
- FONROUGE, C. 2008. Entrepreneuriat et innovations organisationnelles : pratiques et principes. *Revue Française de Gestion* 34, 186, 106–123.
- FORD, G., BARTLEY, T., IGBA, J., TURNER, A., AND MCMAHON, C. 2013. Product Life Cycle Data Management: A Cross-Sectoral Review. *Product Lifecycle Management for Society*, Springer, 58–67.
- FORGUES, D. AND BOTON, C. 2015. BIM projects. Is it the end for the Construction Project Manager? *Proceedings of Asia-Pacific Researchers in Organisation Studies - APROS/EGOS Conference*.
- FORGUES, D., RIVEST, L., DANJOU, C., AND MEYER, J. DE. 2019. De l'Industrie 4.0 à la Construction 4.0 : Des exemples concrets! .
- FORGUES, E.-C. 2017. Adaptation d'un modèle de maturité BIM pour les principaux intervenants de la chaîne d'approvisionnement en construction. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1926/>.
- FROESE, T., HAN, Z., AND ALLDRITT, M. 2007. Study of information technology development for the Canadian construction industry. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34, 7, 817–829.

- GARRIDO, A.C., GARCÍA-SANZ-CALCEDO, J., SALGADO, D.R., AND GONZÁLEZ, A.G. 2017. Planning, Monitoring and Control of Mechanics Projects by the BIM. *Engineering Transactions* 65, 1, 25–30.
- GAYTE, L. 2019. *Amélioration de la sécurisation des passages à niveau | Vie publique.fr.* .
- GENERAL ELECTRIC DIGITAL. 2020. digital twin | GE Digital. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>.
- GERAM. 1999. GERAM: The Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology, IFIP-IFAC Task Force on Architectures for Enterprise Integration. <http://www.ict.griffith.edu.au/~bernus/taskforce/geram/versions/geram1-6-3/v1.6.3.html>.
- GERRISH, T., RUIKAR, K., COOK, M., JOHNSON, M., AND PHILLIP, M. 2017. Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. *Engineering, Construction and Architectural Management* 24, 2, 190–208.
- GLAESSGEN, E. AND STARGEL, D. 2012. The digital twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- GOBIN, C. 2001. *L'ingénierie concourante - Un nouveau professionnalisme*. Editions T.I. | Techniques de l'Ingénieur.
- GREEN, S.D., FERNIE, S., AND WELLER, S. 2005. Making sense of supply chain management: a comparative study of aerospace and construction. *Construction Management and Economics* 23, 6, 579–593.
- GRIEVES, M. 2011. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*. Space Coast Press.
- GRIEVES, M. AND VICKERS, J. 2017. digital twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt and A. Alves, eds., *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer International Publishing, Cham, 85–113.
- GU, N. AND LONDON, K. 2010. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction* 19, 8, 988–999.
- GUESNE, M. 2016. Mise en place d'un processus BIM-PLM (Building Information Modeling & Product Lifecycle Management) dans une démarche de gestion de patrimoine immobilier : réflexion et premières préconisations. 88. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01841383>.
- GUNPINAR, E. AND HAN, S. 2008. Interfacing heterogeneous PDM systems using the PLM Services. *Advanced Engineering Informatics* 22, 3, 307–316.
- GUO, H., YU, R., AND FANG, Y. 2019. Analysis of negative impacts of BIM-enabled information transparency on contractors' interests. *Automation in Construction* 103, 67–79.

- GZARA, L. 2000. Les patterns pour l'ingénierie des systèmes d'information produit. <http://www.theses.fr/2000INPG0141>.
- HAK, K.C., SEOK, K.L., AND BOK, J. 2006. 4D System for Visualizing Schedule Progress of Horizontal Construction Project Including Earthwork. *undefined*. /paper/4D-System-for-Visualizing-Schedule-Progress-of-Hak-Seok/8f78e9ba4d6a204c16d25ce12251074a1302e46b.
- HALIN, G. AND GALLAS, M.-A. 2016. Une approche pédagogique par les modèles pour la sensibilisation au concept de BIM (Maquette Numérique). *SCAN '16 Séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
- HAMDI, O. AND LEITE, F. 2012. BIM and Lean interactions from the bim capability maturity model perspective: A case study. *Computer Science*. /paper/BIM-and-Learn-interactions-from-the-bim-capability-A-Hamdi-Leite/a39acca5288dec06fb4085fc89e4151e8d3afd6.
- HARDIN, B. AND MCCOOL, D. 2015. *BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows*. John Wiley & Sons.
- HEATON, J., PARLIKAD, A.K., AND SCHOOLING, J. 2019. Design and development of BIM models to support operations and maintenance. *Computers in Industry* 111, 172–186.
- HEIKKILA, R., HOVILA, J., AHOLA, J.M., NEVALA, K., AND SCHAFER, T. 2011. Digital Product Process for Construction Product Industry. *ISARC Proceedings*, 734–739.
- HIRTZ, J., STONE, R.B., MCADAMS, D.A., SZYKMAN, S., AND WOOD, K.L. 2002. A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts. *Research in Engineering Design* 13, 2, 65–82.
- HITCHCOCK, R.J., BUTTERFIELD, J., WILKINS, E.F., AND FORNS-SAMSO, F. 2017. BIM-enabled operations and maintenance work processes. *ASHRAE Transactions* 123, 1, 20–25.
- HOARAU, C. AND GATINA, J.-C. 2015. *Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment Développement d'un outil d'analyse de la qualité environnementale des espaces bâtis*. .
- HOLLIGAN, C., HARGADEN, V., AND PAPAKOSTAS, N. 2017. Product lifecycle management and digital manufacturing technologies in the era of cloud computing. *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, IEEE, 909–918.
- HOLZER, D. 2014. Fostering the Link from PLM to ERP via BIM. *Product Lifecycle Management for a Global Market*, Springer Berlin Heidelberg, 75–82.
- HOOPER, M. 2015. Automated model progression scheduling using level of development. *Construction Innovation* 15, 4, 428–448.
- HOWARD, R. AND BJÖRK, B.-C. 2008. Building information modelling – Experts' views on standardisation and industry deployment. *Advanced Engineering Informatics* 22, 2, 271–280.
- ILTER, D.A. 2015. Ilter, D., Ergen, E. (2015) "BIM for Building Refurbishment and Maintenance: Current Status and Research Directions", *Structural Survey: Journal of Building Pathology and Refurbishment*, Vol:33, Iss:3. .

- INSEE. 2016. Définition - Industrie manufacturière | Insee. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1934>.
- ISO STEP. 1995. ISO10303 (STEP: Standard for the Exchange of Product), SSID-STEP/SC4 Industrial Data Framework About. <https://committee.iso.org/home/tc184sc4>.
- JAD CHALHOUB AND AYER, S.K. 2018. Using Mixed Reality for electrical construction design communication. *Automation in Construction* 86, 1–10.
- Ji, F., YOUQUAN, X., DALIN, Z., ZHAO, L., AND ZHANG, Q. 2013. Application of BIM Technique in Some Comprehensive Pipeline Project. *International Project Management Company*. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-SGJS201303037.htm.
- JOBLLOT, L. 2018. Contribution à la mise en œuvre du BIM en rénovation : Proposition d'un Modèle de Maturité BIM spécifique. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02049857>.
- JUPP, J.R. 2013. Incomplete BIM Implementation: Exploring Challenges and the Role of Product Lifecycle Management Functions. In: A. Bernard, L. Rivest and D. Dutta, eds., *Product Lifecycle Management for Society*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 630–640.
- JUPP, J.R. 2016. Cross industry learning: a comparative study of product lifecycle management and building information modelling. *International Journal of Product Lifecycle Management* 9, 3, 258–284.
- JUPP, J.R. AND NEPAL, M. 2014. BIM and PLM: Comparing and Learning from Changes to Professional Practice Across Sectors. *Product Lifecycle Management for a Global Market*, Springer Berlin Heidelberg, 41–50.
- JUPP, J.R. AND SINGH, V. 2014. Similar Concepts, Distinct Solutions, Common Problems: Learning from PLM and BIM Deployment. *Product Lifecycle Management for a Global Market*, Springer Berlin Heidelberg, 31–40.
- KANG, H.-S., LEE, S.-S., NOH, S.-D., AND LEE, K.-M. 2010. C-PLM: Design and Implementation of a PLM System for Effective Management of Civil Projects. *Korean Journal of Computational Design and Engineering* 15, 2, 124–135.
- KASSEM, M., KELLY, G., DAWOOD, N., SERGINSON, M., AND LOCKLEY, S. 2015. BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. *Built Environment Project and Asset Management* 5, 3, 261–277.
- KELLY, G. (GRAHAM), SERGINSON, M. (MICHAEL), LOCKLEY, S. (STEVE), DAWOOD, N. (NASHWAN), AND KASSEM, M. (MOHAMAD). 2013. BIM for facility management: a review and a case study investigating the value and challenges. .
- KIRITSIS, D., BUFARDI, A., AND XIROUCHAKIS, P. 2003. Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. *Advanced Engineering Informatics* 17, 3, 189–202.

- KONCHAR, M. AND SANVIDO, V. 1998. Comparison of U.S. Project Delivery Systems. *Journal of Construction Engineering and Management* 124, 6, 435–444.
- KOTLER, P. AND ARMSTRONG, G. 2010. *Principles of Marketing*. Pearson Education.
- KRITZINGER, W., KARNER, M., TRAAR, G., HENJES, J., AND SIHN, W. 2018. digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51, 11, 1016–1022.
- KUBICKI, S. AND BOTON, C. 2014. IT Barometer Survey in Luxembourg: First Results to Understand IT Innovation in Construction Sector. 179–186.
- KUBLER, S., BUDA, A., ROBERT, J., FRÄMLING, K., AND LE TRAON, Y. 2016. Building Lifecycle Management System for Enhanced Closed Loop Collaboration. In: R. Harik, L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard and A. Bouras, eds., *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*. Springer International Publishing, Cham, 423–432.
- LAAKSO, M. AND KIVINIEMI, A. 2012. The IFC Standard - A Review of History, Development, and Standardization. *J. Inf. Technol. Constr.*
- LAME, G. AND LEROY, Y. 2015. Ecoconception des bâtiments : pratiques actuelles et freins à l'utilisation des outils d'écoconception - Une étude en France. *14e colloque AIP PRIMECA*.
- LATIFFI, A.A., BRAHIM, J., AND FATHI, M.S. 2014. The Development of Building Information Modeling (BIM) Definition. *Applied Mechanics and Materials*. <https://www.scientific.net/AMM.567.625>.
- LEBÈGUE, E. AND CELNIK, O. 2015. *BIM et maquette numérique: pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Eyrolles.
- LEE, S.H. AND KIM, B.G. 2011. IFC extension for road structures and digital modeling. *Procedia Engineering*, Elsevier BV, 1037–1042.
- LEGIFRANCE. 2019. *Arrêté du 18 mars 1991 relatif au classement, à la réglementation et à l'équipement des passages à niveau - Légifrance*. .
- LEITE, F., AKCAMETE, A., AKINCI, B., ATASOY, G., AND KIZILTAS, S. 2011. Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction* 20, 5, 601–609.
- LEMAIRE, C., RIVEST, L., BOTON, C., DANJOU, C., BRAESCH, C., AND NYFFENEGGER, F. 2019. ANALYZING BIM TOPICS AND CLUSTERS THROUGH TEN YEARS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS. 24, 28.
- LÉVY, F. 2011. *BIM in Small-Scale Sustainable Design*. John Wiley & Sons.
- LIU, Z., OSMANI, M., DEMIAN, P., AND BALDWIN, A.N. 2011. The potential use of BIM to aid construction waste minimalisation. .

- LOVE, P.E.D., SIMPSON, I., HILL, A., AND STANDING, C. 2013. From justification to evaluation: Building information modeling for asset owners. *Automation in Construction Complete*, 35, 208–216.
- LU, Q., XIE, X., HEATON, J., PARLIKAD, A.K., AND SCHOOLING, J. 2020. From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management. 392–404.
- MACGRAW HILL CONSTRUCTION. 2014. The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How Contractors Around the World Are Driving Innovation With Building Information Modeling. .
- MADNI, A., MADNI, C., AND LUCERO, S. 2019. Leveraging digital twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems* 7, 1, 7.
- MADNI, A.M., SPRARAGEN, M., AND MADNI, C.C. 2014. Exploring and assessing complex systems' behavior through model-driven storytelling. *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 1008–1013.
- MAHDIKHAH, S. SADAT. 2016. Contribution à l'amélioration de la maturité de la collaboration des PME avec leur donneur d'ordre à travers la gestion du cycle de vie du produit. <https://www.theses.fr/2016ROUES051>.
- MANDHAR, M. AND MANDHAR, M. 2013. BIMing the architectural curricula: integrating Building Information Modelling (BIM) in architectural education. *International Journal of Architecture* 1, 1, 1–20.
- MANGIALARDI, G., DI BICCARI, C., PASCARELLI, C., LAZOI, M., AND CORALLO, A. 2017. BIM and PLM Associations in Current Literature. *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future*, Springer International Publishing, 345–357.
- MAO, S., LEBRUN, J.-L., DOUKARI, O., AGUEJDAD, R., AND YUAN, Y. 2015. Modélisation 3D BIM multi-échelle d'un projet BTP Tunnel. *SAGEO*.
- MARZOUK, M. AND ABDEL ATY, A. 2012. Maintaining Subway Infrastructure Using BIM. 2320–2328.
- MATARNEH, S.T., DANSO-AMOAKO, M., AL-BIZRI, S., GATERELL, M., AND MATARNEH, R. 2019. Building information modeling for facilities management: a literature review and future research directions. *Journal of Building Engineering* 24, 100755.
- MCKINSEY. 2014. Accélérer la mutation numérique des entreprises : un gisement de croissance et de compétitivité pour la France | McKinsey. <https://www.mckinsey.com/fr/our-insights/accelerer-la-mutation-numerique-des-entreprises#>.
- MCKINSEY. 2015. *Reinventing construction through a productivity revolution* | McKinsey. .
- MEDIACONSTRUCT. 2019a. Notions clés à connaître sur le BIM | buildingSMART France, association des acteurs du BIM en France. <https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/>.

- MEDIACONSTRUCT. 2019b. Comprendre le périmètre d'action et les usages du BIM. *buildingsmartfrance-mediaconstruct*. <https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/contexte-bim/>.
- MEHRAN, D. 2016. Exploring the Adoption of BIM in the UAE Construction Industry for AEC Firms. *Procedia Engineering* 145, 1110–1118.
- MERSCHBROCK, C. AND MUNKVOLD, B.E. 2015. Effective digital collaboration in the construction industry – A case study of BIM deployment in a hospital construction project. *Computers in Industry* 73, 1–7.
- MIGILINSKAS, D. AND USTINOVICHUS, L. 2006. Computer-Aided Modelling, Evaluation and Management of Construction Projects According to PLM Concept. *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, Springer, 242–250.
- MIN, K., HAM, N., KIM, J.-H., LEE, Y., AND KIM, J.-J. 2008. An Application Strategy for PLM in Construction Industry. *J. Digit. Content Technol. its Appl.*
- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE. 2019. Les passages à niveau. *Ministère de la Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/passages-niveau>.
- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, C. GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. 2018. Les émissions des gaz à effet de serre du secteur résidentiel. *L'environnement en France - Rapport sur l'état de l'environnement*. <https://ree.developpement-durable.gouv.fr//themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-des-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-residentiel>.
- MINND. 2015. *Modélisation des informations des chaussées sur le cycle de vie*. MINND.
- MOHANTA, A. AND DAS, S. 2016. BIM as facilities management tool a brief review. .
- MOTAWA, I. AND ALMARSHAD, A. 2013. A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction* 29, 173–182.
- MOUCHNINO, N. AND SAUTEL, O. 2007. Coordination productive et enjeux concurrentiels au sein d'une industrie modulaire: l'exemple d'Airbus. *Innovations n° 25, 1*, 135–153.
- NEATH, S., HULSE, R., AND CODD, A. 2014. Building information modelling in practice: transforming Gatwick airport, UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 167, 2, 81–87.
- NÖLDGEN, M., WASSMANN, W., AND HARDER, J. 2015. Closing the GAP in BIM – an Engineering Approach.
- ONKVISIT, S. AND SHAW, J.J. 1989. *Product life cycles and product management*. Quorum Books, New York.
- OPIIEC. 2016. *Evolution de l'ingénierie française de la construction liée au BIM | Opiiec GPEC*.

- PAPIN, O. 2020. Enjeux carbones et secteur de la construction. *E6 Consulting*. <http://www.e6-consulting.fr/enjeux-carbones-et-secteur-de-la-construction/>.
- PAULINE, C., CLEMENT, C., MELANIE, D., XAVIER, K.-P., AND NICOLAS, T. 2016. Révolution numérique dans le bâtiment: : analyse des gains escomptés par la diffusion des outils numériques (BIM et maquette numérique) dans le secteur du bâtiment.
- PEKURI, A., HAAPASALO, H., AND HERRALA, M. 2012. Productivity and Performance Management – Managerial Practices in the Construction Industry.
- PELZETER, A. 2007. Building optimisation with life cycle costs – the influence of calculation methods. *Journal of Facilities Management* 5, 2, 115–128.
- PERNELLE, P. AND LEFEBVRE, A. 2006. Modélisation intégrée et pérennisation des connaissances dans une approche PLM. In: *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*. Hermes sciences, 371–394.
- PINEL, M.M. 2013. L'introduction de la gestion du cycle de vie produit dans les entreprises de sous-traitance comme vecteur d'agilité opérationnelle et de maîtrise du produit. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00852852>.
- POPOV, V., MIKALAIUSKAS, S., MIGILINSKAS, D., AND VAINIŪNAS, P. 2006. Complex usage of 4D information modelling concept for building design, estimation, scheduling and determination of effective variant. *Technological and Economic Development of Economy* 12, 2, 91–98.
- PORWAL, A. AND HEWAGE, K.N. 2013. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects. *Automation in Construction* 31, 204–214.
- PTC. 2015. Partie 1 : Définition du PLM – Présentation générale. https://www.choisirmonerp.com/documents/livres-blancs/BE/FR/5896A_DefiningPLM1_WP_FR.pdf.
- REDDY, K.P. 2011. *BIM for Building Owners and Developers: Making a Business Case for Using BIM on Projects*. John Wiley & Sons.
- REEFMAN, R. AND NEDERVEEN, G.V. 2012. Knowledge management in an integrated design and engineering environment. .
- REZGUI, Y., BEACH, T., AND RANA, O. 2013. A GOVERNANCE APPROACH FOR BIM MANAGEMENT ACROSS LIFECYCLE AND SUPPLY CHAINS USING MIXED-MODES OF INFORMATION DELIVERY. *Journal of Civil Engineering and Management* 19, 2, 239–258.
- REZGUI, Y. AND MILES, J. 2011. *Harvesting and Managing Knowledge in Construction: From Theoretical Foundations to Business Applications*. Routledge, Abingdon, Oxon ; New York.
- SACKS, R., KOSKELA, L., DAVE, B.A., AND OWEN, R. 2010. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management* 136, 9, 968–980.

- SAIEG, P., SOTELINO, E., NASCIMENTO, D., AND CAIADO, R. 2017. Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. *Journal of cleaner production*.
- SCHAUMANN, D. 2013. Adding users' dimension to BIM.
- SCHLEICH, B., ANWER, N., MATHIEU, L., AND WARTZACK, S. 2017. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, 1.
- SEBASTIAN, R. 2011. Changing roles of the clients, architects and contractors through BIM. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- SHAH, R.K., DAWOOD, N., AND DEAN, J.A. 2009. An Innovative Approach for Generation of Virtual Construction Model and a Time Location Plan for Road Construction Projects. .
- SHOU, W., WANG, J., WANG, X., AND CHONG, H.Y. 2015. A Comparative Review of Building Information Modelling Implementation in Building and Infrastructure Industries. *Archives of Computational Methods in Engineering* 22, 2, 291–308.
- SIBERT, B. 2013. Using building information modeling on a highway project. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 166, 1, 9–9.
- SMITS, W., BUITEN, M. VAN, AND HARTMANN, T. 2017. Yield-to-BIM: impacts of BIM maturity on project performance. *Building Research & Information* 45, 3, 336–346.
- SNCF. 2013. UN SYSTÈME AUTOMATIQUE, LE PASSAGE À NIVEAU. http://medias.sncf.com/sncfcom/education/securite/college/seance3/Fiche_activites_corrigee.pdf.
- SNCF RESEAU. 2019. Tout savoir sur un passage à niveau | Prévention ferroviaire - SNCF Réseau. <https://www.prevention-ferroviaire.fr/page/tout-savoir-sur-un-passage-niveau>.
- STEEL, J., DROGEMULLER, R., AND TOTH, B. 2012. Model interoperability in building information modelling. *Software & Systems Modeling* 11, 1, 99–109.
- SUCCAR, B. AND KASSEM, M. 2015. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. *Automation in Construction* 57, 64–79.
- TAHIR, M.M., HARON, N.A., ALIAS, A.H., AL-JUMAA, A.T., MUHAMMAD, I.B., AND HARUN, A.N. 2017. Applications of building information model (BIM) in Malaysian construction industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 291, 012009.
- TANG, F., MA, T., ZHANG, J., GUAN, Y., AND CHEN, L. 2020. Integrating three-dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM. *Automation in Construction* 113, 103152.
- TANG, S., SHELDEN, D.R., EASTMAN, C.M., PISHDAD-BOZORGI, P., AND GAO, X. 2019. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction* 101, 127–139.

- TAO, F., SUI, F., LIU, A., ET AL. 2019. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research* 57, 12, 3935–3953.
- TAURIAINEN, M., MARTTINEN, P., DAVE, B., AND KOSKELA, L. 2016. The Effects of BIM and Lean Construction on Design Management Practices. *Procedia Engineering* 164, 567–574.
- TCHANA DE TCHANA, Y., DUCELLIER, G., REMY, S., AND CASSÉ, M. 2018. Project management for linear infrastructure: studying PLM and BIM for an efficient set of basic functionalities. *12 th International Conference on Modelling, Optimization and SIMulation -MOSIM'18*.
- TCHOUANGUEM DJUEDJA, J.F., KARRAY, M.H., FOGUEM, B.K., MAGNIONT, C., AND ABANDA, F.H. 2019. Interoperability Challenges in Building Information Modelling (BIM). *Enterprise Interoperability VIII*, Springer International Publishing, 275–282.
- TEICHOLZ, P. 2004. Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies -- AECbytes Article. http://www.aecbytes.com/viewpoint/2004/issue_4.html.
- TEICHOLZ, P. 2013. Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look) -- AECbytes Article. http://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_67.html.
- TERZI, S. 2005. Elements of Product Lifecycle Management: Definitions, Open Issues and Reference Models. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009559>.
- TERZI, S., BOURAS, A., DUTTA, D., GARETTI, M., AND KIRITSIS, D. 2010. Product lifecycle management - from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management* 4, 4, 360.
- THORMARK, C. 2000. Including recycling potential in energy use into the life-cycle of buildings. *Building Research & Information* 28, 3, 176–183.
- TOLMER, C.-E. 2016. Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01547312>.
- TOUT-METZ. 2013. Travaux du passage à niveau Patrotte - Devant les Ponts. *TOUT METZ*. <https://tout-metz.com/grue-suppression-passage-a-niveau-patrotte-2013-854.php>.
- UGURLU, D. AND SERTYESILISIK, B. 2019. Usage of BIM in Smart Cities. *International Journal of Digital Innovation in the Built Environment (IJDIBE)*, 11. www.igi-global.com/article/usage-of-bim-in-smart-cities/245733.
- USTINOVIČIUS, L., RASIULIS, R., NAZARKO, L., VILUTIENĖ, T., AND REIZGEVICIUS, M. 2015. Innovative Research Projects in the Field of Building Lifecycle Management. *Procedia Engineering* 122, 166–171.
- VAN WIJK, D. 2011. Contribution à l'amélioration de la collaboration PLM dans la chaîne de sous-traitance aéronautique. <https://www.theses.fr/2011TROY0020>.

- VAN WIJK, D., TROUSSIER, N., EYNARD, B., ROUCOULES, L., AND DUCCELLIER, G. 2009. PLM interopérable pour la conception intégrée et le travail collaboratif en aéronautique. *8ème Congrès International de Génie Industriel*.
- VERSCHOOR, A.H. AND REIJNDERS, L. 1999. The use of life cycle methods by seven major companies. *Journal of Cleaner Production* 7, 5, 375–382.
- WARD, D., BUTLER, C., KHAN, S., AND COYLE, B. 2014. Corrib onshore gas pipeline, Ireland – using BIM on a large infrastructure project. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 167, 3, 123–130.
- WEYGANT, R.S. 2011. *BIM Content Development: Standards, Strategies, and Best Practices*. John Wiley & Sons.
- WILKINSON, S.J. AND JUPP, J.R. 2016. Exploring the value of BIM for corporate real estate. *Journal of Corporate Real Estate* 18, 4, 254–269.
- WON, J. AND CHENG, J.C.P. 2017. Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction* 79, 3–18.
- YABUKI, N., AZUMAYA, Y., AKIYAMA, M., KAWANAI, Y., AND MIYA, T. 2007. Fundamental Study on Development of a Shield Tunnel Product Model. .
- YIN, X., LIU, H., CHEN, Y., WANG, Y., AND AL-HUSSEIN, M. 2020. A BIM-based framework for operation and maintenance of utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 97, 103252.
- ZHENG, C., ASSAF, S., AND EYNARD, B. 2017. Towards Modelling and Standardisation Techniques for Railway Infrastructure. *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future*, Springer International Publishing, 254–263.
- ZHOU, X. 2017. The impacts of BIM implementation on construction project productivity : experiences from China. .
- ZHU, W., EYNARD, B., BRICOGNE, M., REMY, S., AND WAN, W. 2015. Framework for information modeling of an integrated building. .

Annexes

A. Typologie des passages à niveau

Il existe plusieurs types de passages à niveau en France. Cette classification prend en compte plusieurs critères : la présence ou non des feux et barrières, les PN gardés ou non gardés, publics ou privés, ouverts aux véhicules ou seulement aux piétons. Il existe un arrêté (celui du 18 mars 1991) relatif au classement, à la réglementation et à l'équipement des passages à niveau [Légifrance 2019]. Après sa dernière modification le 29 mai 2019, il classe les PN en quatre catégories.

1. Les PN de 1^{ère} catégorie

Il s'agit des PN ouverts à tous les usagers de la route et munis de barrières ou demi-barrières. Il existe deux sous-catégories liées à l'automatisation ou non des mécanismes.

i. Les PN automatiques

Les PN automatiques sont équipés au minimum d'une sonnerie : il s'agit d'une Signalisation Automatique Lumineuse et sonore (PN à SAL). Ce sont les PN les plus répandus sur le réseau ferré français. Il contient au moins, pour chaque sens de circulation routière, deux feux rouges clignotants implantés de part et d'autre de la chaussée. En fonction du nombre de barrières ou de demi-barrières, on distingue :

- PN à SAL à deux demi-barrières : SAL 2

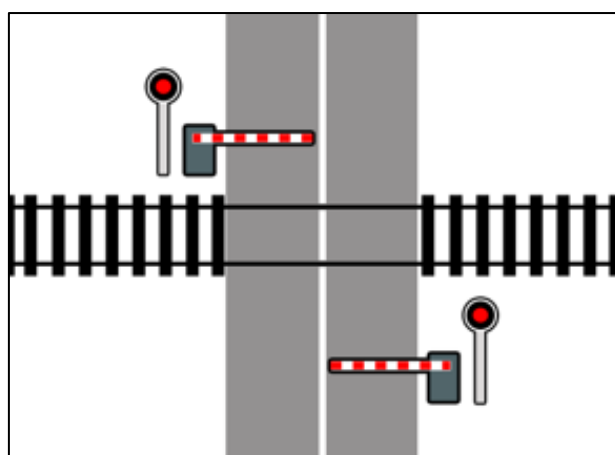


Figure A-1 : PN à SAL 2

- PN à SAL à deux barrières : SAL 2B

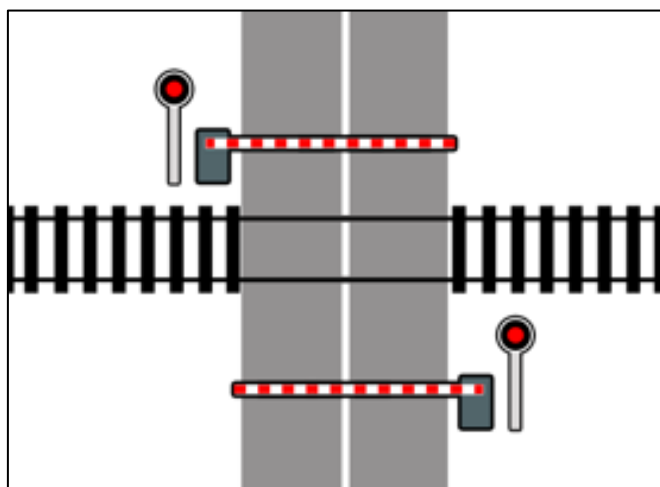


Figure A-2 : PN à SAL 2B

- PN à SAL à quatre demi-barrières : SAL 4. Les quatre demi-barrières en position basse barrent alors toute la largeur de la chaussée, de part et d'autre du passage à niveau. Les PN sont automatiquement de type SAL 4 dans les cas particuliers suivants :
 - PN situé à proximité d'un point d'arrêt où de nombreux trains s'arrêtent ;
 - Fermetures régulières et prolongées d'un passage à niveau sans passage immédiat de train
 - PN situé à proximité d'un centre scolaire ou sportif.

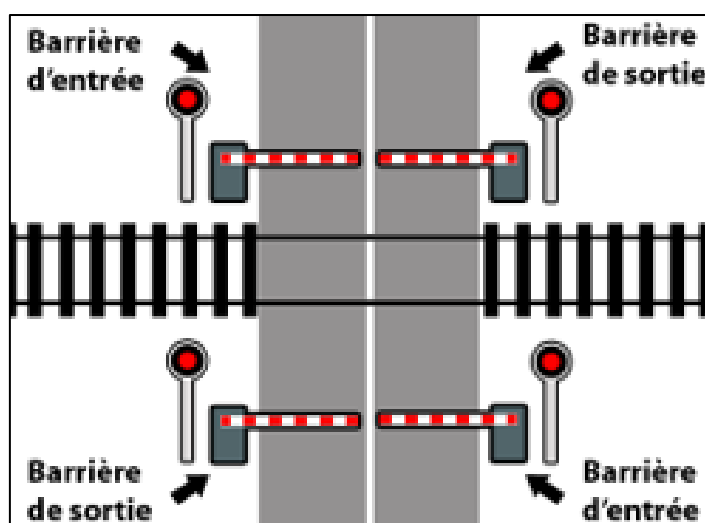


Figure A-3 : PN à SAL 4

ii. Les PN gardés

Un passage à niveau gardé est équipé, au minimum, de barrières, demi-barrières ou tout autre dispositif permettant de barrer la chaussée de part et d'autre des voies ferrées, manœuvrés par un agent habilité par l'exploitant ferroviaire. Les barrières peuvent être complétées par des portillons, équilibrés à la fermeture et non fermés à clé. Ces portillons sont utilisés exclusivement par les piétons, à leurs risques et périls, sans surveillance spéciale par un agent habilité par l'exploitant ferroviaire. Ces équipements peuvent en outre être complétés par un dispositif annonçant l'arrivée des trains à l'agent chargé de manœuvrer les barrières.

2. Les PN de 2e catégorie

Il s'agit des PN publics ouverts à tous les usagers de la route, mais dépourvus de barrières ou de demi-barrières. Ces PN avec croix de Saint-André (implantés à droite de la chaussée, de part et d'autre des voies ferrées) peuvent être munis ou non d'un panneau STOP ou plus rarement de feux R24 (feu clignotant rouge) (SAL 0). Ces PN sont franchis sous l'entière responsabilité des usagers de la route, sans surveillance spéciale par un agent habilité par l'exploitant ferroviaire. L'article 21 de l'arrêté du 18 mars 1991 stipule que les PN situés sur des lignes sur lesquelles il n'y a plus de circulation ferroviaire ou circulées occasionnellement ou exclusivement par des trains de travaux ou des convois militaires et les passages à niveau situés sur des lignes où circulent exclusivement des cyclo-draisines sont classés en catégorie 2 bis.

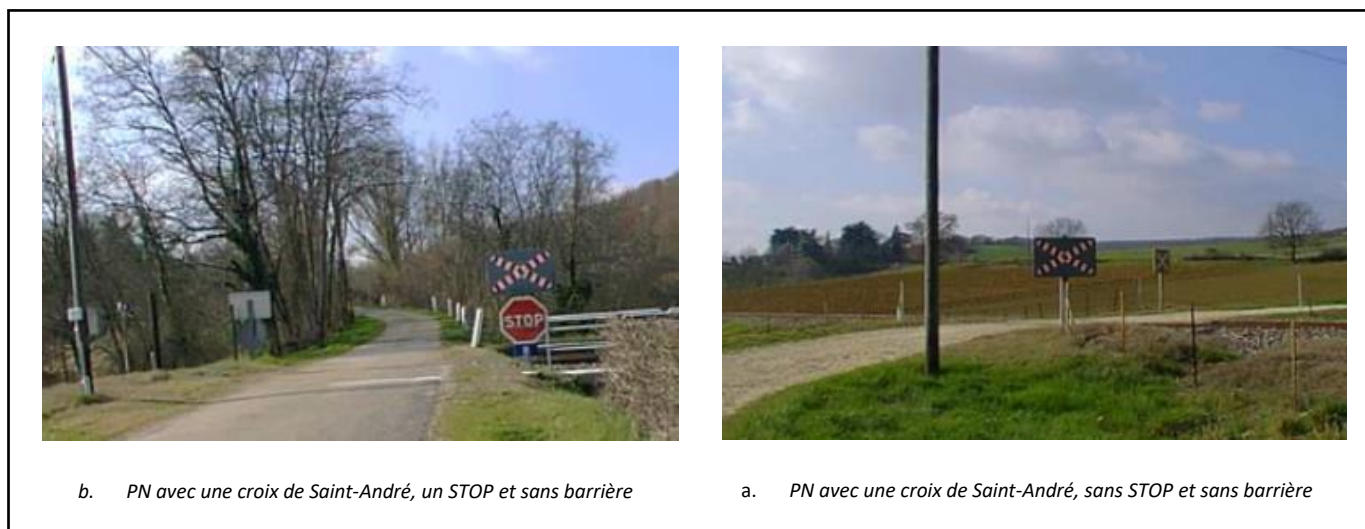


Figure A-4 : PN de 2e catégorie

3. Les PN de 3e catégorie

Les passages à niveau de 3e catégorie ne peuvent être utilisés que par les piétons, à leurs risques et périls, sans surveillance spéciale par un agent habilité par l'exploitant ferroviaire. Dans le cas où ils sont équipés de portillons, ceux-ci sont équilibrés à la fermeture, ne sont pas fermés à clé et sont manœuvrés par les piétons.



Figure A-5 : PN piéton avec portillon

4. Les PN de 4e catégorie

Les passages à niveau de 4e catégorie sont privés et ne sont astreints à aucune surveillance spéciale par un agent habilité par l'exploitant ferroviaire. Ils sont utilisés sous la responsabilité des particuliers ou des personnes morales publiques ou privées, auxquels, à leurs risques et périls, le droit d'utilisation de ces traversées est réservé dans les conditions prévues dans une convention signée avec l'exploitant ferroviaire. Ils ne concernent pas le réseau routier. Sur les lignes ouvertes au trafic voyageurs, ainsi que chaque fois que l'importance du trafic ferroviaire le justifie, ils doivent être munis d'une signalisation automatique, ou de barrières ou de portillons. Dans le cas où ils sont munis de barrières manœuvrées à la main ou de portillons, ces équipements doivent être fermés à clé lorsqu'ils ne sont pas utilisés.



Figure A-6 : PN privé, de la 4e catégorie

Quelques chiffres en France

Le [Ministère de la Transition écologique 2019] évoque la présence de 15 405 passages à niveau en 2017 sur les lignes ouvertes au trafic du réseau ferré national (contre 33 500 en 1938 et 25 000 en 1980), dont 0,4 % sur des routes nationales, 31,4 % sur des routes départementales et 68,2 % sur des voies communales. Le Tableau V-1 donne la répartition quantitative des types de PN. Plus de 60% des passages à niveau du réseau ferré national sont équipés de dispositifs automatiques (feux et/ou barrières). Cela représente près de 450 000 fermetures permettant le passage d'un train. La majorité des passages à niveau subsistants se trouvent à l'intersection de lignes et de routes à faible circulation. Il n'y a aucun passage à niveau sur les lignes à grande vitesse (où les trains circulent à plus de 160 km/h). En France, comme dans de nombreux pays européens, le passage à niveau se ferme en moyenne 25 à 60 secondes avant le passage du train, et sa fermeture n'excède jamais quelques minutes.

Catégorie	Type	Nombre par type	Répartition par catégorie
1ère	SAL 2	9763	72,0%
	SAL 4	564	
	Gardé	757	
2ème	SAL 0	46	18,2%
	Croix de Saint André	2760	
3ème	Piétons	681	4,4%
4ème	Privés	834	5,4%

Tableau A-1 : Répartition des différentes catégories de Passages à Niveau (Sources : SNCF Réseau)

Liste des figures

Figure 0-1 : Macro-processus de mise à jour d'un jumeau numérique.....	18
Figure I-1 : Maturité numérique de différents secteurs économiques (Source : [McKinsey 2014])	21
Figure I-2 : Les étapes projet telles que définies par la loi MOP.....	27
Figure I-3 : Productivité horaire apparente (Source : [OPIIEC 2016]).....	29
Figure I-4 : Evolution de la maquette numérique en fonction des phases projet.....	31
Figure I-5 : Contenu technique des différents niveaux de maturité du BIM. (Source : [BIM Blog Luxembourg 2015]	34
Figure II-1 : ROI global rapporté par les entreprises (Source : [OPIIEC 2016] depuis [MacGraw Hill Construction 2014])	44
Figure II-2 : Le rythme de montée en compétences du BIM (Source : [OPIIEC 2016]).....	45
Figure II-3 : Les standards ouverts solution à la problématique d'interopérabilité (Source : [Laakso and Kiviniemi 2012])	48
Figure II-4 : Evolution du Jumeau Numérique selon [Kritzinger et al. 2018].....	58
Figure III-1 : Architecture produit d'une chaussée (Source : [MINND 2015]).....	65
Figure III-2 : Définition d'applicabilités sur l'architecture de la chaussée (Source : [MINND 2015])	66
Figure III-3 : Architecture de la chaussée en contexte (Source : [MINND 2015]).....	66
Figure III-4 : Extraction de plusieurs vues de la structure produit.....	69
Figure III-5 : Phases du cycle de vie produit au marché (Source : [Onkvisit et Shaw 1989]	71
Figure III-6 : Modèle de référence STEP de cycle de vie du produit (Source : [ISO STEP 1995])	72
Figure III-7 : Modèle de référence du GERAM pour le cycle de vie produit (Source : [GERAM 1999])	73
Figure III-8 : Macro-processus du cycle de vie d'une infrastructure linéaire (Source : [COMMUNIC 2012])	75
Figure III-9 : Cycle de vie d'un objet	78
Figure IV-1 : Les trois composantes d'un jumeau numérique d'après General Electric.....	89
Figure IV-2 : Jumeau Numérique comme data visualizer	90
Figure IV-3 : Possible environnement logique de notre jumeau numérique	91
Figure IV-4 : Différentes vues du Jumeau Numérique au cours de son cycle de vie	93
Figure IV-5 : Transitions possibles entre les différentes vues du Jumeau Numérique.....	95

Figure IV-6 : Exemple de scénario possible de transitions entre les différentes vues du Jumeau Numérique.....	96
Figure IV-7 : Étapes vers l'enrichissement d'un jumeau numérique par cas d'usages	100
Figure V-1 : Illustration graphique d'un passage à niveau	105
Figure V-2 : Passage à Niveau près de la gare de Romilly/Seine	107
Figure V-3 : Environnement du PN d'intérêt (Source : Google Maps)	108
Figure V-4 : Arborescence produit d'un passage à niveau.....	109
Figure V-5 : Composants du fonctionnement général d'un passage à niveau automatique (Source : [SNCF 2013]).....	110
Figure V-6 : Analyse opérationnelle d'une gare ferroviaire proche d'un PN	112
Figure V-7 : Cycle de vie d'un passage à niveau	114
Figure V-8 : Exemple d'évolution des données d'un jumeau numérique.....	119
Figure V-9 : Scénario global d'utilisation du jumeau numérique.....	122
Figure V-10 : Illustration du process d'exploitation et maintenance	132
Figure V-11 : Process d'Analyse et Modification de l'existant	133
Figure A-1 : PN à SAL 2	154
Figure A-2 : PN à SAL 2B	155
Figure A-3 : PN à SAL 4	155
Figure A-4 : PN de 2e catégorie.....	156
Figure A-5 : PN piéton avec portillon	157
Figure A-6 : PN privé, de la 4e catégorie	157

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Définitions des LOD	31
Tableau I-2 : Les dimensions du BIM.....	32
Tableau I-3 : Comparaison Bâtiment vs Travaux Publics en France en 2018.....	36
Tableau I-4 : Structure détaillée de la clientèle (en millions d'euros)	37
Tableau II-1 : Correspondance entre LOD et évolution du jumeau numérique	60
Tableau III-1 : Exemple d'arborescence d'un projet d'autoroute (Source : [COMMUNIC 2012])	67
Tableau III-2 : Correspondances entre les différents cycles de vie.....	74
Tableau IV-1 : Groupements communs de fonctionnalités entre le BIM et le PLM	86
Tableau IV-2 : Un nouveau système basé à la fois sur BIM et PLM	87
Tableau V-1 : Contenu des vues du jumeau numérique	117
Tableau V-2 : Typologie des interventions sur le jumeau numérique tout au long du cycle de vie	118
Tableau A-1 : Répartition des différentes catégories de Passages à Niveau (Sources : SNCF Réseau).....	158

Yvan TCHANA DE TCHANA

Doctorat : Matériaux, Mécanique, Optique, Nanotechnologie

Année 2021

Proposition d'un jumeau numérique pour soutenir la gestion de l'exploitation d'une infrastructure linéaire

La croissance du numérique au sein de l'industrie de la construction conduit au BIM (*Building Information Modeling*). Inspiré du bâtiment, le BIM est adopté plus tard sur des projets d'infrastructure linéaire. Ces projets nécessitent une maîtrise de bout en bout de la chaîne d'information. Le PLM (*Product Lifecycle Management*) favorise cette continuité numérique dans l'industrie manufacturière. Des études expérimentent une utilisation complémentaire des approches BIM et PLM pour ce type de projet. Adaptant des méthodes développées pour la construction de bâtiments, ces études se limitent à l'élaboration de référentiels de données. Cela rend difficile la gestion de l'infrastructure dans sa phase d'usage, où la maquette numérique doit devenir un jumeau numérique. Ces travaux consistent à développer une stratégie pour la conception, la mise en œuvre et l'exploitation d'une infrastructure linéaire. Cible de la démarche, le jumeau numérique intégrera non seulement BIM et PLM, mais aussi toute autre source d'information qui resitue l'infrastructure dans son environnement. Agrégateur de données, il devrait permettre d'assurer la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire. Ce système est éprouvé sur une infrastructure linéaire particulière, un passage à niveau. La continuité numérique et la traçabilité des données sont des facteurs importants pour un tel ouvrage. Notre proposition permet de suivre l'évolution de la donnée, et de lier des données d'exploitation aux données de conception et de construction de l'infrastructure.

Mots clés : modélisation des données du bâtiment – produits commerciaux, cycle de vie, gestion – travail collaboratif – projet d'infrastructure – jumeau numérique.

Digital Twin Proposal to Support a Linear Infrastructure Operations Management

The digital growth of the construction industry led to BIM (Building Information Modeling). Developed for buildings, BIM is later used on linear infrastructure projects. Such projects require end-to-end control of information. PLM (Product Lifecycle Management) supports digital continuity in the manufacturing industry. Studies evaluate the relevance of a complementary use of the BIM and PLM approaches for linear infrastructure projects. With an adaptation of methods used for building construction, those studies are mostly restricted to the implementation of data repositories. This makes it difficult to consider the infrastructure post-construction phase, where the 3D model is no longer a digital model, but a digital twin. This research work consists in developing a strategy for the design, the implementation and the operations and maintenance of a linear infrastructure. The digital twin of the infrastructure is the target of our approach. It will take into consideration not only BIM and PLM methodologies, but also any other data source positioning the infrastructure in its geographical environment. Data aggregator, our digital twin should make it possible to manage the lifecycle of a linear infrastructure. This system is tested on a specific linear infrastructure, a level crossing. Digital continuity and data traceability are important factors for those constructions. Through the digital twin, our proposal helps to follow the data, and thus to link operational data to the design and construction data of the linear infrastructure.

Keywords: Building Information Modelling – product lifecycle, management – collaborative engineering – infrastructure project – digital twin.

Thèse réalisée en partenariat entre :

