



HAL
open science

Structurer l'information pour le jumeau numérique

Ana Roxin, Christophe Castaing, Charles-Edouard Tolmer

► **To cite this version:**

Ana Roxin, Christophe Castaing, Charles-Edouard Tolmer. Structurer l'information pour le jumeau numérique. Le BIM, nouvel art de construire, ISTE Group, pp.89-105, 2023, 10.51926/ISTE.9110.ch4 . hal-04026993

HAL Id: hal-04026993

<https://hal.science/hal-04026993v1>

Submitted on 7 Mar 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

4

Structurer l'information pour le jumeau numérique

Ana Roxin¹, Christophe Castaing² et Charles-Edouard Tolmer³

¹ *Laboratoire Informatique de Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France*

² *Egis, Paris, France*

³ *Eurovia Infra (Vinci), Rueil-Malmaison, France*

4.1. Introduction

Contrairement aux paradigmes de la conception artisanale et empirique, les éléments clés du paradigme de la conception abstraite sont:

- la notion de modèle et de modélisateur est toujours centrale : concevoir c'est modéliser,
- la coproduction, par des équipes pluridisciplinaires et la circulation des modèles entre équipes en présence ou à distance sont mis en avant,
- la répartition du travail se fait par des processus codifiés et non de manière taylorienne comme pour la conception empirique,
- l'utilisation de modèles génériques et prescriptifs abstraits à partir desquels seront générés des processus et artefacts concrets devient centrale.

Dans ce paradigme de la conception abstraite, la conception repose sur un outil particulier, qui n'est ni un banc d'essai, ni une maquette, ni un schéma, mais un modèle générique, susceptible aussi bien de décrire l'artefact (ce que nous appellerons plus tard « le système à faire ») que son processus de conception (appelé plus loin « système pour faire »). Azhar (2011) décrit le BIM comme le nouveau paradigme du secteur de la construction. Cela reflète un avis largement répandu dans la profession de la construction. On considère aussi que le BIM, en tant que méthodologie,

Le BIM, modélisations partagées, données communes, le nouvel art de construire,
coordonné par Régine Teulier et Marie Bagieu. Version auteur

regroupe, pour les projets, les conséquences du changement de paradigme (Tolmer 2016). Les nouveaux besoins en modélisation et en formalismes, la vision système d'un projet, ainsi que la gestion des exigences sont quelques-unes de ces conséquences. Elles nécessitent de penser globalement l'information projet, notamment au travers des modèles de données, des améliorations dans l'interopérabilité, etc.

4.2. Problématique

Au fur et à mesure que les processus numériques se mettent en place et se généralisent dans l'acte de construire ou de maintenir, cette vision de la structuration de la donnée / de l'information s'impose, parce que le jumeau numérique ou l'actif virtuel s'impose pour le maître d'ouvrage comme l'un des livrables nécessaires pour répondre à la gestion complète du cycle de vie d'un ouvrage. L'actif est à comprendre au sens patrimonial, tel que traduit dans l'ISO 19650-1:2018: " item, chose ou entité qui a une valeur potentielle ou réelle pour un organisme" (ISO 19650-1:2018). Cet actif virtuel impose le besoin d'une démarche « scientifique » pour aborder la transformation des données en connaissances et la mise en place de processus permettant une interopérabilité entre les modèles sous-jacents de ces connaissances. Comment à partir de toutes les données disponibles pour un ouvrage on obtient-on de l'information pertinente? Comment peut-on la modéliser et comment peut-on en extraire des connaissances ? Voici quelques-unes des questions auxquelles ce chapitre tentera de répondre. Toujours afin d'obtenir des processus numériques efficaces et les plus fidèles à la réalité du terrain, il s'agira d'implémenter une interopérabilité entre les modèles d'informations. Ce chapitre examinera les liens entre modélisations et normalisation de ces modélisations en vue d'interopérabilité, le tout appliqué au contexte du jumeau numérique.

Le jumeau numérique (ou encore l'actif numérique) est un système d'information : il s'agit de transformer de la donnée non structurée en de l'information structurée autour de laquelle se développent des services permettant son exploitation. Le premier service est le partage, dans les 4 états de l'information, tel que défini dans la première partie de la norme ISO 19650 (ISO 19650-1:2018).

Un ouvrage de génie civil doit répondre à une exigence première : la durabilité, et ce aussi bien dans le sens donné à "pérennité" qu'à "soutenable". Or la donnée et l'information (voir définitions plus bas) ne possèdent pas naturellement cette propriété. Pour obtenir la description numérique d'un ouvrage construit, il faut pouvoir faire correspondre des données venues de plusieurs horizons : des domaines techniques différents, des outils de conception différents, des référencements géométriques différents, des approches de l'ouvrage différentes. On parle alors d'un

besoin d'interopérabilité. La norme ISO 17261 (ISO 17261:2012) définit l'interopérabilité comme la « capacité que possèdent des systèmes à fournir des services et à recevoir des services d'autres systèmes et à utiliser les services ainsi échangés afin de fonctionner ensemble de manière efficace ». D'un point de vue machine, implémenter une interopérabilité revient à relier deux systèmes informatiques hétérogènes, afin qu'ils puissent collaborer, ce qui implique un accès réciproque à leurs ressources. L'interopérabilité elle-même, n'a aucune raison de répondre au critère de la pérennité : la diversité d'une part et le cycle de vie des outils d'autre part ne s'inscrivent pas naturellement dans cette exigence. La normalisation s'impose donc pour graver dans le temps, l'interopérabilité des données et du système de relations mises en œuvre pour obtenir un système d'information. L'objet de ce chapitre est de montrer quels sont les outils disponibles pour structurer de l'information autour des modèles (géométriques et sémantiques) permettant non seulement de décrire pleinement les ouvrages à construire ou déjà construits, mais surtout pour développer un ou des modèles nécessaires que l'on dénommera ouverts et neutres, dès lors qu'ils seront normalisés. En ce sens les travaux de normalisation dans le domaine vont bien au-delà de la simple création d'un consensus sur des connaissances antérieures.

Deux définitions sont importantes à rappeler :

- « Les données sont des observations ou des éléments obtenus à partir de mesures de variables » (ISO 772:2011).
- L'information est une « représentation ré-interprétable de données, formalisée de manière à être adaptée pour la communication, l'interprétation ou le traitement ». (ISO 19650:2018).

Ce couplage entre données et informations s'intègre dans ce qu'Ackoff (1989) appelle la « pyramide de la connaissance » (figure 4.1), et qui permet de relier la prise de décision dans un schéma de continuité données > informations > connaissances > actions (figure 4.2).

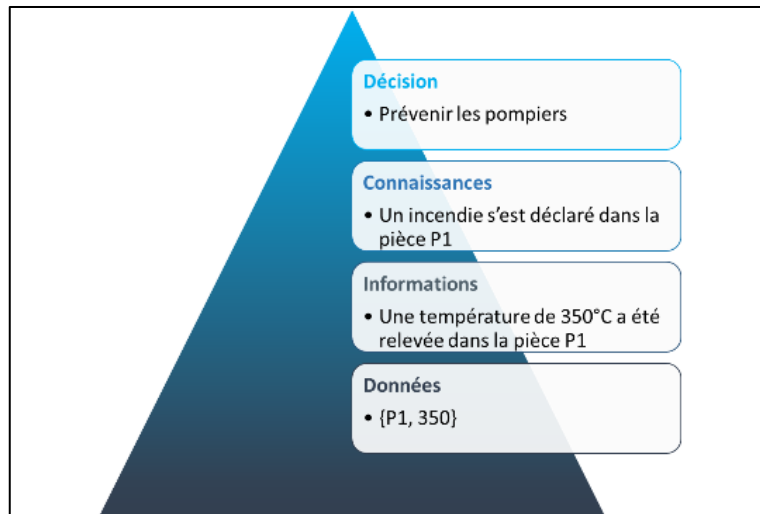


Figure 4.1. Pyramide de la connaissance adaptée depuis Ackoff (1989)

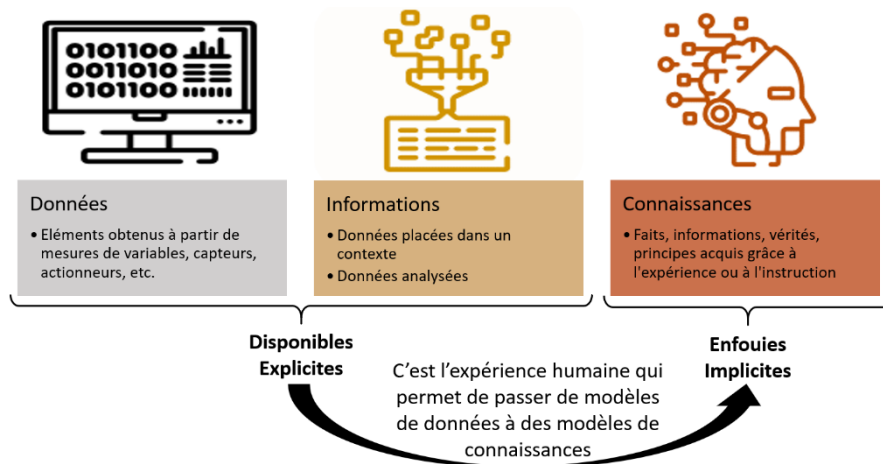


Figure 4.2. De la « donnée » à la « connaissance » - cette figure résume l'heuristique qui a mené l'industrie de la construction à réfléchir à la structuration des données.

Le jumeau numérique devra contenir à la fois les modèles statiques et des modèles analytiques (dits aussi dynamiques), qui sont deux sortes d'abstractions (une

abstraction est une modélisation et donc nécessairement une simplification) différentes d'une même réalité, celle de l'ouvrage et de son environnement. Chaque modèle a son utilité et son degré de simplification par rapport à la réalité. Toutefois, le jumeau numérique doit permettre d'assurer une certaine continuité et cohérence des données, informations et connaissances dans chaque modélisation.

Il s'avère que, progressivement et depuis plusieurs années, dans les travaux de modélisation faits par l'industrie de la construction, une jonction va s'opérer avec l'industrie manufacturière autour de l'ingénierie système, pour deux raisons :

- le besoin de décomposer un ouvrage non pas seulement comme des objets, mais aussi comme des systèmes (pas seulement manufacturiers, mais aussi en tant qu'objets conceptuels) et des espaces,
- le besoin de comprendre le processus de construire, comme un système en soi, nécessaire à la production de l'actif numérique.

Le jumeau numérique repose sur l'interopérabilité qui elle-même repose sur la normalisation. En effet, trois approches existent pour implémenter l'interopérabilité : des modèles peuvent être unifiés, intégrés ou fédérés (ISO 11354-1:2011). Le jumeau numérique requiert tout d'abord une modélisation (qui permet de structurer les données), puis une normalisation des modèles (qui permet d'obtenir des informations) et enfin une interopérabilité entre modèles (qui amène les connaissances). Pour cette dernière, trois possibilités existent (ISO 14258:1998): deux modèles peuvent être intégrés, unifiés ou encore fédérés.

Ce processus, de même que l'utilisation de données, informations et enfin connaissances, est illustré par la figure 4.3.

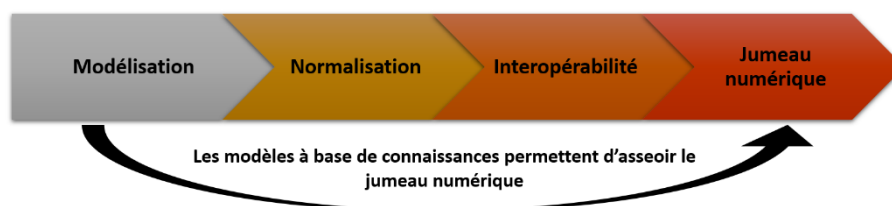


Figure 4.3. De la modélisation vers le jumeau numérique

La connaissance, s'utilise deux fois dans ce processus :

- À l'origine du processus, pour imaginer la décomposition en objets et en systèmes

- A l'issue du processus, comme résultat, pour rendre compte de la réalité de l'ouvrage réalisé.

Décrire la structuration des données nécessaire à la livraison d'un asset numérique, passe par cette heuristique contenue dans la définition ci-dessous.

Le jumeau numérique est un système d'information s'appuyant sur les éléments suivants :

- une progression organisée entre une donnée et une information ;
- une description et une organisation des données, au sein d'un contexte, pour les structurer sous forme d'informations ;
- une ontologie, qui est sa modélisation sémantique, c'est-à-dire une spécification explicite et formelle des connaissances en lien et de l'interprétation qui peut en être faite dans un contexte donné ;
- une distinction et une répartition entre modèle conceptuel et modèle sémantique (ontologie) ;
- une interopérabilité sémantique entre modèles permettant à un ordinateur d'interpréter de manière cohérente les ressources d'un autre système, et d'échanger des connaissances avec un autre système informatique.

4.2.1. Les systèmes complexes

Les résultats scientifiques actuels sont significatifs concernant la modélisation et le contrôle de systèmes techniques. Néanmoins, une gestion efficace de ces systèmes est souvent hors de notre portée et nécessite la conception de solutions logicielles spécifiques. Les problèmes actuels liés au développement durable et à la préservation de l'environnement sont complexes et composites. Leur étude et leur modélisation reposent sur des approches pluridisciplinaires et résultent en la définition de systèmes complexes. Étant donné que les systèmes complexes s'imbriquent dans de nombreux processus sociaux, technologiques et naturels et sont en lien avec diverses organisations, il n'existe pas de solutions ou d'approches uniques pour les modéliser (ou les concevoir). Nous allons préciser ce qu'on entend par « système », comment se définit la complexité d'un système, et nous discuterons des différences entre systèmes complexes et systèmes de systèmes.

4.2.1.1. Définitions et caractéristiques d'un système

Selon Levin (2006), un « système » est défini comme un « ensemble de parties interdépendantes ou en interaction temporelle », où les parties sont, en général, elles-mêmes des systèmes comprenant d'autres parties. L'annexe D de la norme ISO 15288 (ISO15288:2015) considère que ces systèmes sont « d'origine humaine, créés et

utilisés pour fournir des services dans un environnement défini au bénéfice d'utilisateurs et autres parties prenantes ».

La théorie générale des systèmes de Bunge (Bunge 1979) précise les 3 composants d'un système, à savoir :

- la composition C d'un système est représentée par l'ensemble de ses parties
- l'environnement E d'un système est défini en tant que l'ensemble d'entités en lien avec les parties présentes dans la composition (C) du système.
- la structure S d'un système est composée de l'ensemble de relations internes (entre les éléments de la composition C du système) et externes (entre les éléments de la composition du système et les éléments de l'environnement E du système)

Ces 3 composants amènent les 3 propriétés suivantes :

- l'interconnectivité représente l'ensemble de liens externes d'un système
- l'interconnectivité entre le système et son environnement engendre des vulnérabilités et des risques qui doivent être analysés et exposés pour les gestionnaires de systèmes, les sponsors et les décideurs de politiques publiques
- l'interdépendance se définit comme l'ensemble de liens internes du système
- la complexité est le nombre de parties rentrant dans la composition C du système et qui sont en interaction les unes avec les autres. Plus il y a d'interfaces entre ces parties, plus la complexité du système associé est importante

On retiendra deux aspects : d'une part la notion de complexité définie à partir du nombre d'interfaces, et d'autre part, la notion de système qui s'adresse à ce qui est issu de la création humaine.

4.2.1.2. *Systèmes complexes et « systèmes de systèmes »*

Les systèmes complexes se caractérisent par un grand nombre de composants en interaction. Les systèmes complexes couvrent plusieurs dimensions, y compris les sous-systèmes économiques, écologiques et sociaux, qui peuvent avoir n'importe quel niveau d'interaction entre eux. Les exigences posées tout au long du cycle de vie adressent cette complexité.

Afin de mieux illustrer le concept de « système complexe », prenons l'exemple d'un projet ferroviaire (figure 4.4). Dans ce contexte, la complexité apparaît comme une évidence, au travers du nombre d'interfaces liées aux sous-systèmes qui le

composent e.g. interfaces entre le système complexe « Environnement » et les systèmes complexes « Routier » et « Rail ». La figure 4.4 permet aussi de définir les systèmes de systèmes comme un cas particulier de systèmes complexes. En effet, l'ensemble des systèmes illustrés découle d'une même organisation, à savoir celle qui structure le fonctionnement du système ferroviaire de façon intrinsèque. Mais la dimension environnementale, ne découle pas d'une quelconque structuration d'un projet ferroviaire. Le « système environnemental » a son propre fonctionnement, ses propres règles de comportement et nécessite une ou des modélisations spécifiques. L'utilité de cette décomposition oblige à penser, dans le cadre d'une ingénierie dirigée par les modèles, des modèles de nature différente, que l'usage d'une ontologie ne peut régler.

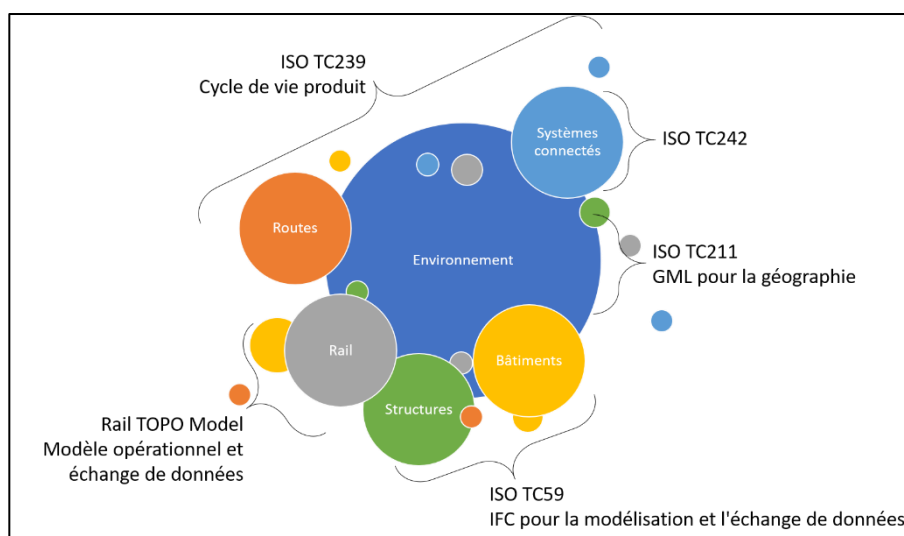


Figure 4.4. Illustration d'un cas particulier de système complexe e.g. un système de systèmes

Cette approche permet également d'envisager des réponses aux problématiques des réseaux intelligents ou des villes intelligentes, puisque qu'il va falloir envisager non seulement l'interaction de systèmes et de sous-systèmes complexes, mais aussi, celle de l'interaction avec un environnement qui ne possède pas de dépendance fonctionnelle avec les systèmes des réseaux ou de la ville.

Cette remarque permet de comprendre que le traitement de ces interactions nécessite d'aller au-delà de l'identification de l'interface et de traiter la modélisation de cet environnement, avec des modèles conceptuels différents. Il faut entendre que

la modélisation de la géologie ou de la faune, devrait s'appuyer sur des règles, des relations et des représentations différentes de celles utilisées pour la représentation d'un artefact.

Dans ce qui suit, nous présentons les enjeux métier de la modélisation, puis nous discutons des principaux défis associés. Enfin nous présentons les principales approches existantes, et ce à deux niveaux : à un niveau conceptuel et à un niveau implémentation. Ce qui suit découle du deuxième volet de l'heuristique : la vision du BIM comme point de départ de la création du jumeau numérique, oblige à penser le jumeau dans sa dynamique. Imaginer l'objet à construire dans son évolution tout au long de son cycle de vie : comprendre l'interaction et les impacts des processus de conception, construction et d'exploitation sur le jumeau numérique. On ne peut pas seulement modéliser les données, il faut également représenter et donc modéliser les processus.

4.2.2. La problématique métier : systèmes « pour faire » et systèmes « à faire »

Comme nous allons le voir, l'ingénierie système n'est pas l'unique solution au nouveau paradigme de la conception. Certains auteurs (Rochet 2007 ; Fiorèse et Meinadier 2012) la décrivent plus comme un outil de réflexion, comme une méthode de travail ouverte et non comme un modèle générique à dériver sur chaque projet. Elle est également évoquée comme « évolution scientifique nécessaire pour concevoir des écosystèmes urbains durables » (Rochet et Peignot 2013).

De nos jours, ces systèmes adaptatifs complexes évoluent pour faire face aux incertitudes et aux changements de l'environnement opérationnel, des valeurs sociales et des avancées technologiques. La croissance des populations humaines et la demande croissante de ressources naturelles limitées imposent aux villes durables d'utiliser des infrastructures efficaces pour la production d'énergie, la gestion de l'eau ou encore le transport. L'intelligence artificielle (IA), les algorithmes d'apprentissage automatique, les capacités de détection et d'activation omniprésentes, le contrôle en temps réel, l'informatique en nuage, ainsi que la science et l'analyse des données sont parmi les principaux outils de ces systèmes.

Étant donné que, selon le domaine métier considéré, l'ingénierie système est pratiquée de différentes manières, dans ce qui suit, nous présentons les problématiques sous-jacentes à cette modélisation de systèmes dans le cadre de projets d'infrastructure.

Le jumeau numérique doit être compris comme une représentation, non plus seulement statique, mais aussi dynamique d'un ouvrage : dès son origine la représentation numérique doit intégrer les marqueurs du suivi de sa progression dans le cycle de vie. L'information doit être gérée pour une utilisation adaptée et doit donc également porter la donnée en la qualifiant (la métadonnée). L'organisation en arborescence est inefficace, voire fragile comparée à la modélisation de la métadonnée permettant un accès et une traçabilité plus puissante.

Le développement du BIM et du jumeau numérique pousse à faire évoluer les processus vers la « conception abstraite » évoquée plus haut. La transition numérique du secteur de la construction dans la gestion de projet introduit la valorisation de l'information, de la structuration en graphes avec métadonnées et non plus en arborescences de dossiers, gestion de dictionnaires de données et de catalogues produits, etc. D'autres proviennent de l'introduction de nouvelles méthodes, issues d'autres industries comme la gestion des exigences, l'ingénierie système, la gestion de la connaissance, le PLM, etc. La modélisation pourrait être le dénominateur commun pour accorder ces paradigmes et donc ces conceptualisations et structurations différentes de l'information. L'utilisation de formalismes communs, normalisés ou à défaut standardisés, pour modéliser semble être une perspective prometteuse d'après de nombreux travaux réalisés dans d'autres industries.

La norme ISO 19650 (2018) du jumeau numérique (l'AIM) en est l'illustration. Elle répond à deux objectifs. Celui de représenter l'asset et celui de le faire vivre. L'ISO 19650 (2018) nous décrit deux types d'exigences : celles portant sur les « performances » de l'asset (exigences sur l'asset, le produit), et celles sur les performances des processus du projet pour contribuer à la réalisation permanente et dynamique de jumeau numérique (figure 4.5).

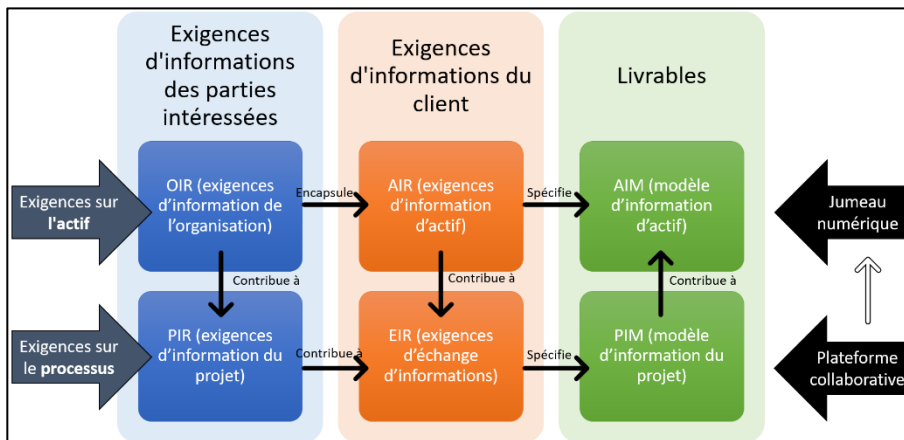
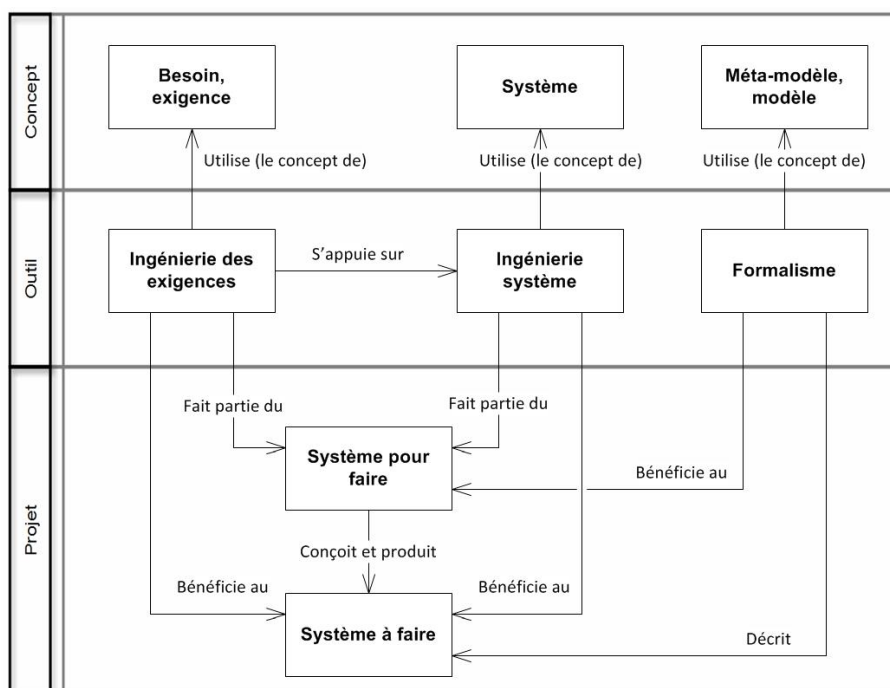


Figure 4.5. Structuration apportée par l'ISO 19650 (2018)

La norme ISO 19650 (2018) structure l'objet à réaliser (le produit ou « système à faire ») et les processus, garantissant le cycle de vie de la donnée et sa qualification (le projet ou « système pour faire »). L'utilisation de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences est renforcée par l'utilisation de formalismes communs de modélisation. (Tolmer 2016) (Figure 4.6). En effet, l'utilisation de bases communes de modélisation facilite la continuité et la cohérence des modèles conceptuels : ce besoin était également présenté en Figure 4.4.

**Figure 4.6.** Concepts et outils méthodologiques pour les "Système pour faire" et "Système à faire" (Tolmer 2016).

Si l'on part de l'hypothèse que la MN (Maquette Numérique) d'un ouvrage portet une certaine valeur, complémentaire à celle de l'ouvrage physique lui-même, travailler à l'organisation du « système pour faire » (le projet) apparaît comme plus pertinente aujourd'hui que la gestion de la complexité du « système à faire » (l'ouvrage), souvent mieux maîtrisée. La complexité des ouvrages est généralement inférieure ou techniquement mieux maîtrisée que la complexité des échanges et du

partage de l'information, même pour les ouvrages les plus complexes techniquement. Dans les projets, ce qui aujourd'hui reste peu ou mal défini ce ne sont pas le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) ni les exigences techniques à satisfaire, mais bien les exigences liées à la démarche BIM, notamment du point de vue des échanges d'informations, du travail collaboratif et des étapes pour la coordination. De manière plus large, aujourd'hui, le numérique interroge plus les pratiques que les techniques (Dejoux et Léon 2018). Gérer les compétences numériques dans les entreprises et dans les projets est devenu un véritable défi, par la complexité et la transversalité des compétences à acquérir, mais également par le manque de ressources. La différenciation du "système à faire" et du "système pour faire" facilite la gestion de ces deux complexités de projet (Figure 4.6). Toutefois, il est démontré que l'utilisation de ces concepts et outils méthodologiques ne bénéficient au système à faire (la raison même de l'organisation d'un projet) que s'ils sont mobilisés par et pour le système pour faire, (Figure 4.6). En effet la vérification des exigences s'opère directement sur le "système à faire" dans le cadre de la réception des ouvrages.

Illustrons ce propos pour une phase d'appel d'offre de travaux. Pour qu'une démarche BIM bénéficie à l'ouvrage, il convient d'appliquer une démarche d'ingénierie système et d'ingénierie des exigences sur le système pour faire. Ici, nous utilisons le formalisme SADT – Structured analysis and design technique. La convention BIM (l'ensemble des éléments qui décrivent la partie connotée BIM du système pour faire) est préparée en tenant compte de son environnement (contraintes, Figure 4.7) et des entrants du projet qui portent sur l'ouvrage lui-même (le système à faire).

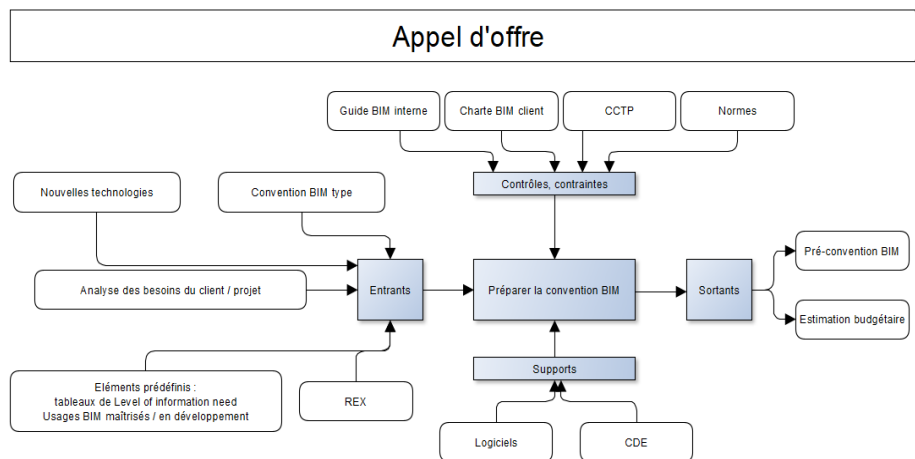


Figure 4.7. SADT pour la préparation de la convention BIM de projet.

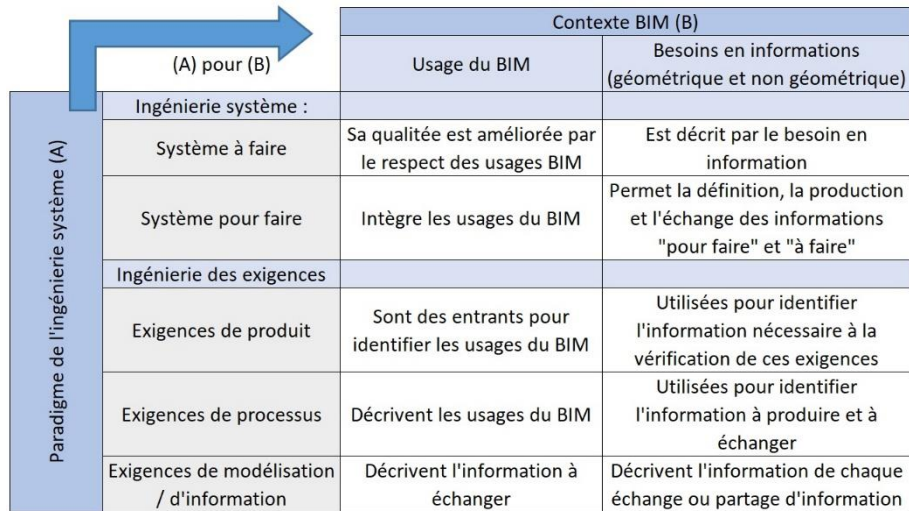
Les deux Tableaux (4.1 et 4.2) montrent plus en détail comment des concepts de l'ingénierie système et de l'ingénierie des exigences permettent de structurer les processus BIM d'un projet mais également les processus plus généraux (exemple ici du Plan de Management de Projet PMP), c'est-à-dire le système pour faire. Sont ici considérés plusieurs types d'exigences :

- De produit : performances, qualité, caractéristiques métier des objets ou systèmes,
- De processus : démarches réglementaires comme la loi sur l'eau, le permis de construire, les circuits de validation, etc.
- De modélisation ou d'information : l'information qui doit être échangée ou modélisée : objets 3D, propriétés de ces objets mais également les documents ou autres données du projet.

Dans un contexte de travaux, le système à faire est à la fois l'ouvrage physique à construire et l'ensemble des informations qui le décrit.

		Contexte BIM (B)	
		Plan de management de projet (PMP)	Plan d'exécution BIM, PEB (ISO 19650-2:2018)
Paradigme de l'ingénierie système (A)	(A) pour (B)		
	Ingénierie système :		
	Système à faire	X	Contraint le PEB
	Système pour faire	Est décrit dans le PMP	Contraint le PEB (usages du BIM)
	Ingénierie des exigences		
	Exigences de produit	(Décrites dans le CCTP)	Sont des entrants pour identifier les usages du BIM
	Exigences de processus	Sont reprises dans le PMP	Décrites dans le PEB
Exigences de modélisation / d'information	X	Décrites dans le PEB	

Tableau 4.1 Interprétation et utilisation des concepts de l'ingénierie système dans un contexte BIM (Plan de Management de Projet (PMP) et Plan d'Exécution BIM (PEB)).



Paradigme de l'ingénierie système (A)	Ingénierie système :	Contexte BIM (B)	
		Usage du BIM	Besoins en informations (géométrique et non géométrique)
	Système à faire	Sa qualité est améliorée par le respect des usages BIM	Est décrit par le besoin en information
	Système pour faire	Intègre les usages du BIM	Permet la définition, la production et l'échange des informations "pour faire" et "à faire"
	Exigences de produit	Sont des entrants pour identifier les usages du BIM	Utilisées pour identifier l'information nécessaire à la vérification de ces exigences
	Exigences de processus	Décrivent les usages du BIM	Utilisées pour identifier l'information à produire et à échanger
	Exigences de modélisation / d'information	Décrivent l'information à échanger	Décrivent l'information de chaque échange ou partage d'information

Tableau 4.2 Interprétation et utilisation des concepts de l'ingénierie système dans un contexte BIM (« Usage du BIM » et « Besoin en information », conformément à la définition de la norme FR EN 17412-1:2020 : Level Of Information Need).

Les enjeux actuels de la modélisation sont la pérennité, la continuité, la cohérence et l'unicité de l'information sur tout le cycle de vie d'un ouvrage, d'une infrastructure mais également du territoire. En ce sens, une modélisation efficace d'un tel système complexe, tant du point de vue conceptuel que du point de vue des formalismes, doit permettre d'avoir une proximité suffisante et adaptée à la réalité de l'ouvrage, de même qu'un niveau de détail respectant cette réalité par rapport aux usages.

4.2.3. Les défis associés à la modélisation de systèmes complexes

Alors que les pratiques actuelles en ingénierie des systèmes complexes s'appuient sur des processus bien-définis et des approches analytiques innovantes, les pratiques autour du BIM doivent être vues à partir des nombreux défis liés aux besoins d'intégration et d'interdisciplinarité. Le degré de contrôle sur les différentes composantes du système complexe qu'est le jumeau numérique varie aussi. En effet, alors qu'il est possible de contrôler les sous-systèmes techniques ou de gestion, les composants indépendants d'un système de systèmes génèrent leurs propres décisions, non contrôlées à un niveau système. Les degrés de contrôle sur ces composants dépendent de la capacité du système global à contrôler les sous-systèmes qui génèrent leurs propres décisions.

En reprenant les trois décompositions de l'ISO 19650-1:2018 de l'ingénierie des systèmes (Figure 4.5), augmentées de la décomposition spatiale nécessaire aux ouvrages du BTP, la prise de décision ne peut se faire sur la simple description des objets construits. Le retour à la description fonctionnelle est indispensable pour pouvoir visualiser/représenter le jumeau numérique dans son comportement. En fonction de l'événement, il faut non seulement identifier sur quelle partie de l'ouvrage physique il s'agit d'intervenir mais aussi décrire, le comportement de l'ouvrage associé. Les utilisateurs de ces sous-systèmes s'attendent à ce que des outils leur permettent de prévisualiser et de corriger les états du système complexe, en tenant compte de son auto-organisation et de son adaptation à son environnement.

	Explication
Certifier des connaissances	Permettre à des utilisateurs non experts d'évaluer le degré d'utilité de connaissances expert dans une prise de décision
Assembler des connaissances	Intégrer des connaissances de sources différentes afin de supporter les besoins du décideur
Traduire des connaissances ou désassembler	Convertir des concepts complexes ou trop large en un cadre pour la prise de décision (possibilités, motivations)
Fournir des connaissances	Afin de supporter la prise de décision

Tableau 4.3. Défis associés à la gestion de connaissances expertes dans un processus de décision.

Il s'agit donc de passer d'une gestion de données (via la modélisation), à une gestion d'informations (via la normalisation) afin de pouvoir espérer une gestion de connaissances (via l'interopérabilité sémantique), le tout implémenté au travers d'un processus numérique continu (jumeau numérique). La décomposition analytique des modèles sous-jacents passe par l'implémentation d'une approche d'interopérabilité au préalable, entre les modèles existants. En effet, quel que soit le domaine considéré, il ne peut donc y avoir un modèle unique de la connaissance. Ceci soulève inévitablement des défis (résumés dans le tableau 4.3) en termes de modélisation des connaissances en lien avec le jumeau numérique.

4.3. Conclusion

Nous avançons aujourd'hui dans le paradigme de la conception abstraite. La gestion de l'information et de la connaissance de l'ouvrage sera facilitée par la convergence et la continuité des modélisations. Pour cela, il conviendra d'assurer la continuité d'interprétation entre nombreux concepts, modèles de pensée : la gestion des exigences, qui est souvent considérée comme le point d'entrée pour satisfaire aux besoins du client, l'ingénierie des systèmes, les modèles conceptuels de données

spécifiques aux différents métiers et domaines d'activités, les formalismes de modélisation, les formats d'échanges, etc. En effet, la construction du milieu urbain intègre tous types d'ouvrages dont des bâtiments, infrastructures, ouvrages industriels, le sol, le sous-sol, qui ont tous des interprétations différentes des concepts précédemment cités. Dans une optique de trajectoire bas carbone par exemple, la conception, la construction et l'exploitation du milieu urbain nécessiteront l'utilisation de données, d'information et de connaissances qui auront besoin de cette cohérence au sein du jumeau numérique.

4.4. Bibliographie

- Ackoff, R. (1989) From Data to Wisdom. *Journal of Applied Systems Analysis* 16: 3–9
- Azhar, S. (2011) Building Information Modeling (BIM): trends, benefits, risks and challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, ASCE, pages 241–252.
- Bot, L., & Vitali, M. L. (2011). *Modélisation et activités des ingénieurs*. Paris: Editions L'Harmattan.
- Bunge M (1979) *Treatise on Basic Philosophy, Volume 4. Ontology II A World of Systems*. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel
- Déjoux et Léon (2018) *Métamorphose des managers à l'ère du numérique et de l'intelligence artificielle*. Pearson France, Montreuil.
- Fiorèse, S. et Meinadier, J.-P. (2012) *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. Collection AFIS (Associations Française d'Ingénierie Système), Cépaduès édition, Toulouse.
- Levin, M.S. (2006) *Composite Systems Decisions (Decision Engineering)* Springer, New York, Inc.
- Micaelli, J.P., Bonjour, E., Deniaud, S. et Loise, D. (2011) L'ingénierie système fondée sur les modèles. Dans *Modélisation et activités des ingénieurs*, Bot, L., Vitali, M. L. (dir.) Bot, L., Vitali, M. L. (2011) *Modélisation et activités des ingénieurs*. Editions L'Harmattan, Paris, chapitre 5.
- MIN^oD (2019) S1 UC1 Th3, *Approche holistique des infrastructures Cadre de référence - Parties 1 et 2*.

- Norme NF EN ISO 14258 (1998) Systèmes d'automatisation industrielle — Concepts et règles pour modèles d'entreprise
- Norme NF EN 17 412-1 (2020) Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes - Modélisation des Informations pour la Construction (BIM) - Niveau d'Information Requis - Concepts et Principes
- Norme ISO 772 (2011). Hydrométrie — Vocabulaire et symboles.
- Norme ISO 17261 (2012). Systèmes intelligents de transport — Identification automatique des véhicules et des équipements — Architecture et terminologie du transport intermodal des marchandises.
- Norme ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) Ingénierie des systèmes et du logiciel — Processus du cycle de vie du système
- Norme ISO 19650-1 (2018). Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) — Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction — Partie 1: Concepts et principes
- Norme ISO 11354-1 (2011) Technologies d'automatisation avancées et leurs applications — Exigences relatives à l'établissement d'un processus d'interopérabilité pour les entreprises de fabrication — Partie 1: Cadre pour l'interopérabilité d'entreprise
- Rochet, S. (2007) Formalisation des Processus de l'Ingénierie Système Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Rochet, C. et Peignot, J. (2013) De la gestion des villes à la conception d'écosystèmes urbains durables. Dans MED6, Marseille.
- Tolmer, C.E. (2016) Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concurrente pour la mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets. Thèse de doctorat, Université Paris Est, Paris.