

Livrable

Approche holistique des infrastructures Cadre de référence - Partie 2

Auteurs/Organismes

Christophe CASTAING (Egis)
Pierre BENNING (Bouygues Travaux Publics)
Vincent COUSIN (Processus & Innovation)

Karim SELOUANE (Resallience/
Vinci Construction)
Charles-Edouard TOLMER (Eurovia)
Nicolas ZIV (Bouygues Travaux Publics)

Structuration des données (Thème 3) Approche holistique (UCI)

MINnD_TH03_UC01_02_Approche_holistique_Partie2_013B_2019
Avril 2019

Sommaire

| | |
|---|----|
| 1. GLOSSAIRE..... | 2 |
| 2. RÉSUMÉ..... | 5 |
| 3. ABSTRACT | 6 |
| 4. PRÉAMBULE | 8 |
| 5. INGÉNIERIE DES EXIGENCES..... | 9 |
| 5.1. Qu'est-ce que l'ingénierie des exigences ?..... | 9 |
| 5.2. Typologies d'exigences | 11 |
| 5.3. Gestion et modélisation des exigences | 13 |
| 5.4. Exigences « SMART » | 14 |
| 6. STRUCTURATION DES EXIGENCES PAR L'INGÉNIERIE SYSTÈME..... | 16 |
| 6.1. Qu'est-ce que l'ingénierie système ?..... | 16 |
| 6.2. Architecture des systèmes | 18 |
| 6.3. Intégration de l'espace dans l'ingénierie système | 23 |
| 6.4. « Système à faire » et « systèmes pour faire »..... | 30 |
| 6.5. Cycle en V..... | 34 |
| 7. MODÉLISATION EN INGÉNIERIE SYSTÈME | 47 |
| 8. STRUCTURATION DE L'INFORMATION | 49 |
| 8.1. Qu'est-ce que la structuration de l'information ?..... | 49 |
| 8.2. Mise en œuvre de la structuration | 50 |
| 9. EXEMPLE SUR UN CAS D'USAGE : LA 5 ^E LIGNE DE LYON | 55 |
| 10. DE LA STRUCTURATION DES EXIGENCES AUX USAGES BIM | 57 |
| 11. CONCLUSION..... | 60 |
| 12. ANNEXES | 62 |
| 12.1. Annexe I : objectifs métiers et usages BIM pour le projet..... | 62 |
| 13. TABLE DES ILLUSTRATIONS..... | 64 |
| 14. BIBLIOGRAPHIE..... | 65 |

I. GLOSSAIRE

| Terme | Définition |
|--------------------|---|
| Acteur | Un acteur est une personne physique ou un système distant qui interagit avec le système étudié pour atteindre un but précis (Badreau & Boulanger, 2014). |
| Besoin | Un besoin est : <ul style="list-style-type: none"> • Une nécessité, un désir, un manque ou une insatisfaction éprouvé par un utilisateur (Badreau & Boulanger, 2014). • Une nécessité ou un désir exprimé pour un utilisateur ou par toute partie prenante intéressée par l'utilisation et l'exploitation du système (Fiorèse & Meinadier, 2012). |
| Exigence | Une exigence est un énoncé qui traduit un besoin ou des contraintes (techniques, coût, délais, etc.). Cet énoncé est rédigé dans un langage qui peut être naturel, mathématique, etc. (définition AFIS). Une exigence doit être SMART, c'est à dire : <ul style="list-style-type: none"> • Spécifique. • Mesurable. • Atteignable. • Réalisable. • Traçable. |
| Ingénierie système | L'ingénierie système est définie dans (ANSI/EIA 632, 1998) ainsi : « L'ingénierie système est une approche interdisciplinaire qui englobe tous les efforts techniques pour développer et vérifier un ensemble de solutions relatives aux systèmes, aux utilisateurs et aux processus dans un cycle de vie total et intégré pour satisfaire des besoins client. » |
| Métamodèle | Un métamodèle est un modèle de modèle, et la « méta-modélisation » est le processus permettant de générer ces modèles. Il s'agit d'analyser la définition et le développement de structures, règles, contraintes et théories applicables et utiles pour modéliser une classe de problèmes prédéfinis. |
| Partie prenante | Une partie prenante est une personne physique ou morale qui a une influence ou un intérêt direct/indirect dans un projet. Cette définition convient au terme d'acteur plus couramment utilisé dans notre industrie de la construction (Badreau & Boulanger, 2014). |
| Projet | Dans le cadre de l'ingénierie système, un projet est un processus unique qui consiste en un assemblage d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin. Un projet est entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coût et de ressources. (ISO, ISO 9000:2015, 2015), (ISO, ISO 10006:2017, 2017) et (NF ISO 10006, 1998). Le terme projet désigne le processus de développement d'un système et plus spécifiquement ici d'une infrastructure. Un projet est également considéré par l'ingénierie système comme un système (Fiorèse & Meinadier, 2012). |
| Prototype | Un prototype est un objet destiné à vérifier la faisabilité d'une solution sous un aspect particulier (Badreau & Boulanger, 2014). La maquette numérique 3D est donc un prototype selon un ou plusieurs usages. On crée plusieurs prototypes pour plusieurs usages. |

| Terme | Définition |
|---------|---|
| Système | <p>Un système est un ensemble de composants matériels, logiciels et humains qui coopèrent d'une manière organisée, dans un but d'atteindre un objectif commun (Badreau & Boulanger, 2014).</p> <p>Un système est constitué d'un ensemble d'éléments dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné (Fiorèse & Meinadier, 2012).</p> <p>Trois concepts sont fondamentaux pour comprendre ce qu'est un système :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'interaction (ou l'interrelation) renvoie à l'idée d'une causalité non linéaire. Ce concept est essentiel pour comprendre la coévolution et la symbiose en biologie. Une forme particulière d'interaction est la rétroaction (ou feed-back) dont l'étude est au centre des travaux de la cybernétique. • La totalité (ou la globalité). Si un système est d'abord un ensemble d'éléments, il ne s'y réduit pas. Selon la formule consacrée, le tout est plus que la somme de ses parties. Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1968) est le premier à l'avoir montré. Cette idée s'éclaire par le phénomène d'émergence : au niveau global apparaissent des propriétés non déductibles des propriétés élémentaires. Nous pouvons expliquer cela par un effet de seuil. • L'organisation est le concept central pour comprendre ce qu'est un système. L'organisation est l'agencement d'une totalité en fonction de la répartition de ses éléments en niveaux hiérarchiques. Selon son degré d'organisation, une totalité n'a pas les mêmes propriétés. On arrive ainsi à cette idée que les propriétés d'une totalité dépendent moins de la nature et du nombre d'éléments qu'ils contiennent que des relations qui s'instaurent entre eux. |

| Terme | Définition |
|---------------------|---|
| Système de systèmes | <p>Un système de systèmes résulte du fonctionnement collaboratif de systèmes constituants. Ces derniers peuvent fonctionner de façon autonome pour remplir leur propre mission opérationnelle (Wikipédia, 2019).</p> <p style="text-align: center;">Systemes – Système de systèmes</p> <p>↪ Systemes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tous les éléments sont nécessaires à l’accomplissement de la mission du système • UN référentiel système unique • UN projet/programme <p>↪ Système de systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les systèmes constitutifs sont autonomes mais inter-opèrent entre eux → Percolation • N référentiels → Cohérence des référentiels • N projets/programmes → Cohérence de la planification – Migrations et reprise de l’existant (<i>legacy</i>) • Coordination – Interopérabilité et modèles d’échanges <p style="text-align: right;"><small>©2006 J.Printz - D.Krob / Terminologie et concepts SDSVersion 2.0 - Page 11</small></p> |
| Système à faire | <p>Le « système à faire » est initialement un concept, une abstraction. Le résultat concret de sa réalisation est un « produit » (produit-système) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ayant les caractéristiques d’un système. • Répondant à une définition qui précise toutes les caractéristiques techniques, de production, d’exploitation, de maintenance, etc. |
| Système pour faire | <p>Le « système pour faire » est doté de ressources humaines et techniques. Il est mis en place afin d’organiser, exécuter et coordonner toutes les activités qui conduisent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • De l’énoncé de la finalité. • À la réalisation et à la mise à disposition du « système à faire » (ou système étudié). <p>Le « système pour faire », est organisé sous forme d’un ou plusieurs projets.</p> |
| Système complexe | <p>La complexité d’un système tient au moins à trois facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le degré élevé d’organisation. • L’incertitude de son environnement. • La difficulté, sinon l’impossibilité d’identifier tous les éléments et de comprendre toutes les relations en jeu. D’où l’idée que les lois permettant de décrire un système ne peuvent être purement déterministes, ou, tout au moins, que son comportement global ne permet qu’une prédictivité réduite. |
| Usage BIM | <p>Un usage BIM est un processus numérique élémentaire (domaine des techniciens BIM) qui, seul ou en combinaison, répond à objectif métier. Un usage BIM nécessite souvent des prérequis.</p> <p>Exemples de prérequis</p> <p>L’usage BIM « 4D » nécessite un découpage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spatial. • En système du projet. • En plots de bétonnage. <p>Ces éléments :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Doivent être cohérents avec la décomposition en tâches du planning. • Nécessite donc un travail préalable de découpage et de classification des « objets » du projet. |

2. RÉSUMÉ

Le projet d'infrastructure, un projet complexe...

Un projet d'infrastructure répond parfaitement à la définition d'un système complexe, notamment au travers des éléments suivants :

- Le nombre de **parties prenantes** qui le compose.
- La grande **diversité des disciplines** et des compétences qu'il faut mobiliser.
- Son **environnement normatif et réglementaire**.
- Le nombre **d'exigences et de contraintes** auxquelles les infrastructures doivent répondre. Cela induit un grand nombre de simulations et de tests à réaliser pour les vérifier et les valider.

... qui génère un grand nombre d'informations...

Un grand nombre d'informations est généré tout au long du processus :

- De planification (programmation).
- De conception.
- De construction.
- D'exploitation.
- voire de démantèlement.

Ces importants flux d'informations doivent être collectés, traités, archivés soigneusement structurés et tracés de manière cohérente et intelligible pour l'ensemble des parties prenantes et notamment :

- Le maître d'ouvrage.
- Les futurs utilisateurs.

... à partir desquelles les acteurs de la construction doivent se positionner

Voilà le cadre général dans lequel les acteurs de la construction doivent se positionner afin de :

- Modéliser les informations relatives au développement des infrastructures.
- Mettre en place une démarche BIM pour les infrastructures.

Objectif du présent livrable

Nous vous avons présenté dans le livrable précédent les grandes lignes d'un cadre de référence pour le développement du BIM dans les infrastructures.

Dans ce second livrable, nous vous présentons :

- Des propositions de mise en œuvre de méthodes liées à :
 - L'ingénierie des exigences (et des outils permettant de modéliser et de gérer les exigences).
 - L'architecture système.
 - La décomposition des systèmes en vues opérationnelle, fonctionnelle et organique appliquées au cycle en V.
- Un métamodèle pour le développement de systèmes complexes.

3. ABSTRACT

The infrastructure project, a complex project...

Building large or capital-intensive civil infrastructure is a complex task:

- In terms of the infrastructure to be built and operated per se.
- In terms of the process to build it combining human and material resources and knowledge.

An infrastructure project matches perfectly the definition of a complex project delivered by the system engineering. The complexity is the direct result of the large number of interfaces such as:

- The fact that, unlike most of the industrial projects, infrastructure projects are built:
 - To be physically if not mechanically integrated into a physical and living environment (the biosphere whether anthropic or natural) singular to a particular location.
 - To be operated for very long periods of time where the unit of scale is more the decades or the centuries than the years).
- The number of **stakeholders and actors involved**.
- The **large diversity of disciplines and skills** that must be mobilised.
- The **regulatory environment**.
- The **growing number of requirements** that:
 - Must be fulfilled (or compromised in case they are conflicting).
 - Requires extensive simulations of the proposed solutions before being all verified and validated against all stakeholders and actors' needs.

... generating a huge amount of information...

Huge amount of information is generated during:

- The design phase.
- The renovation phase.
- The build phase.
- The recycle phase.
- The operation phase.

This information must be collected, treated, archived, carefully structured and traced in a meaningful manner – intelligible for all stakeholders and actors, among which most importantly the final clients and customers.

... that sets the business environment

The generated information sets the business environment in which one has to engineer:

- The building information model in its most general manner.
- The BIM process for infrastructure.

Purpose of this deliverable

In the previous deliverable, we presented the main aspects of a reference framework for the development of BIM in infrastructure.

In this second deliverable, we present:

- Proposals for the implementation of methods related to:
 - Requirements engineering (and tools for modelling and managing requirements).
 - System architecture.
 - The breakdown of systems into operational, functional and organic views applied to the V cycle.

- A meta-model for the development of complex systems.

4. PRÉAMBULE

Un livrable basé sur une démarche « ingénierie système »...

L'approche de ce livrable est basée sur une démarche « Ingénierie systèmes ». Cette démarche est peu, voire jamais utilisée dans le secteur de la construction.

L'utilisation de ce corpus méthodologique avait été amorcée dans la première tranche du projet de recherche MINnD pour la définition des cas d'usage BIM dans les infrastructures. Nous étendons ici à la structuration des informations.

... qui commence par la notion d'exigences...

Prise en compte des besoins

Cette partie commence par la notion d'exigences, point d'entrée de tout projet et de tout contrat. Une exigence prenant en compte les besoins :

- Des décideurs et des futurs usagers.
- Des espaces et de l'environnement impactés.
- Des techniques et des réglementations locales.

Influence sur les systèmes et leurs objets

Ces exigences découlent sur :

- La structuration nécessaire pour la définition des systèmes assurant les fonctions à pourvoir.
- La classification des objets composants ces systèmes, si possible quels que soient le type de projet et l'environnement réglementaire du pays concerné.

Pré-normalisation

Ce travail doit naturellement déboucher sur une pré-normalisation, ou tout du moins sur une contribution vers les organismes de normalisation internationaux.

... et se termine sur la liste exhaustive des objectifs élémentaires

Enfin, et pour rendre ce livrable opérationnel, la démarche aboutit sur :

- La liste exhaustive des objectifs élémentaires de tout projet d'infrastructure.
- La structuration des données à garantir pour réaliser les usages nécessaires au déploiement d'une démarche BIM sur un nouveau projet.

En effet, les prérequis pour la réalisation de certains usages BIM exigent un travail préparatoire conséquent, souvent négligé au démarrage d'une démarche BIM.

Exemple

Découpage du projet en système avec niveaux de développement attendus à chaque phase d'étude.

5. INGÉNIERIE DES EXIGENCES

5.1. Qu'est-ce que l'ingénierie des exigences ?

Définition

Nuseibeh et Easterbrook (2000) définissent l'ingénierie des exigences (IE) comme suit :

L'ingénierie des exigences Nuseibeh et Easterbrook (2000)

« Processus de découverte, de définition et de documentation des exigences par l'identification des parties prenantes et de ses besoins sous une forme qui permet l'analyse, la communication et l'implémentation. »

Une approche systémique constituée de règles et de méthodes

L'ingénierie des exigences est une approche systémique constituée d'un ensemble de règles, de méthodes. Ces règles et méthodes permettent de spécifier et gérer les exigences tout au long du cycle de vie du système à réaliser.

Un processus multidisciplinaire centré sur l'humain...

Selon Nuseibeh et Easterbrook (2000), l'IE est un processus multidisciplinaire et centré sur l'humain qui implique :

- Les parties prenantes (épistémologie).
- Ce qui est observable (phénoménologie).
- Ce qui est considéré comme vrai (ontologie).

... au centre des approches d'ingénierie système...

Initialement, l'IE et l'IS (ingénierie système) étaient 2 corpus différents. Les premiers développements de l'ingénierie des exigences :

- Ont été entrepris dans l'industrie logicielle.
- Se sont ensuite étendus aux autres industries.

Aujourd'hui, l'ingénierie des exigences est au centre des approches d'ingénierie système (Badreau & Boulanger, 2014). La figure 1 met en évidence l'existence de deux types d'exigences habituellement utilisées dans l'IE.

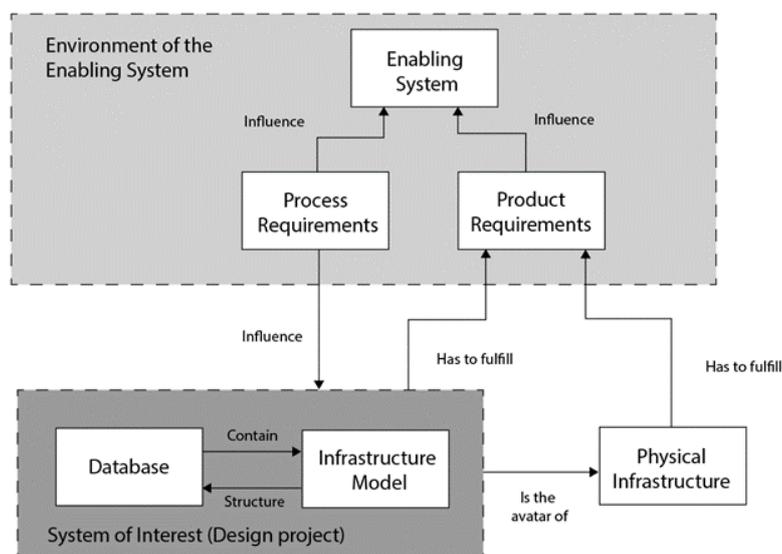


Figure 1 : exigences de « produit » et de « projet » adapté de Tolmer (2016)

... d'une grande importance dans les projets complexes...

Le rapport CHAOS du Standish Group souligne que le premier facteur d'échec dans les grands projets est une mauvaise gestion des exigences (Standish Group, 2014). Cela souligne la grande importance de l'ingénierie des exigences pour les projets complexes.

Les quelques bulles de la bande dessinée de Scott Adams (figure 2) illustrent bien ce phénomène. Si les exigences du futur système ne sont pas bien prises en compte ou si elles ne sont pas claires, cela ne vaut même pas la peine de commencer un projet. Cela est d'autant plus vrai pour un projet complexe.

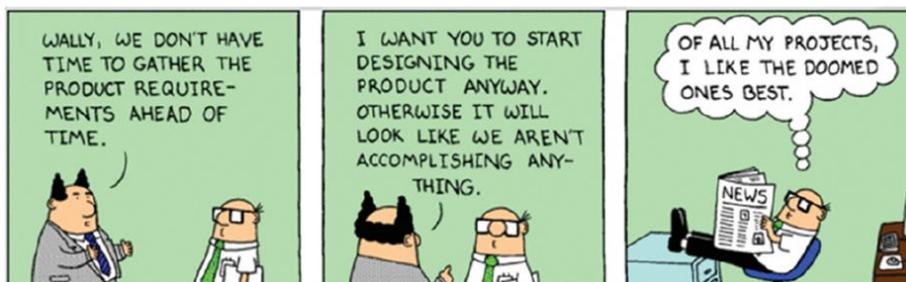


Figure 2 : de l'importance d'une bonne gestion des exigences (Scott Adams, 1997)

... et qui possède 14 objectifs séparés en 3 catégories

Zave (1997) définit 14 objectifs liés à l'ingénierie des exigences. Ces objectifs sont séparés en 3 catégories. Ils étaient initialement applicables à l'industrie du logiciel, mais ils sont facilement transposables à n'importe quel autre système artificiel.

- Investiguer les objectifs, fonctions et contraintes du système à réaliser
 - Améliorer la communication entre parties prenantes ;
 - Développer des stratégies pour transformer des objectifs de « valeurs » (ex : interface conviviale, sécurité, précision, fiabilité etc.) en propriétés spécifiques mesurables du système ;
 - Comprendre les priorités et les intervalles de satisfaction ;
 - Générer des stratégies pour allouer les exigences aux éléments du système et à son environnement ;
 - Estimer les risques, coûts et délais ;
 - S'assurer de la complétude des exigences.
- Préciser le comportement du système à réaliser
 - Intégrer plusieurs vues et représentations du système ;
 - Évaluer des solutions différentes pour répondre aux exigences ;
 - Obtenir des spécifications complètes, spécifiques, et non-ambiguës ;
 - Vérifier que le système répond bien aux exigences ;
 - Définir des exigences qui sont cohérentes avec les activités de conception et de réalisation.
- Gérer l'évolution des systèmes et des familles de systèmes à réaliser
 - Réutiliser des exigences pour des phases ultérieures du projet ;
 - Réutiliser des exigences pour un autre projet similaire.

5.2. Typologies d'exigences

Des exigences à différencier

Dans PLCS¹, le concept d'exigence est identique à celui considéré dans l'ingénierie système :

Concept d'exigence dans PLCS

« The term "requirement" is used here in the sense that term is used in systems engineering and similar industrial domains. »

Cependant, PLCS ne distingue aucune sémantique de différenciation dans les exigences. Or, de nombreuses approches de classification des exigences existent.

Approche I : classification des exigences par vision

La classification des exigences par vision s'applique autant au « système à faire » qu'au « système pour faire ». Dans cette classification, les exigences opérationnelles sont également appelées :

| | |
|-------------------|---|
| Besoins | Renvoient principalement au client. |
| Contrainte | Renvoient principalement à la réglementation. |

¹ PLCS : Product Life Cycle Support ISO 10303-239

Avantages

Cette distinction permet de différencier :

- Les exigences venant de l'environnement du « système à faire » (besoin et contrainte).
- Des exigences qui en découlent et qui sont donc spécifiées par le « système pour faire » pour la caractérisation du « système à faire ».

Schématisation

Les exigences par vision sont définies dans le schéma ci-après :

Définition des exigences par vision

| Vision | Question posée | Objet concerné |
|----------------|----------------|--------------------------|
| opérationnelle | Pourquoi ? | Projet ou grands système |
| fonctionnelle | Quoi ? | Système |
| organique | Comment ? | Composant |

Krob, D. (2009). Eléments d'architecture des systèmes complexes.

Figure 3 : définition des exigences par vision

**Approche 2 :
description des
exigences sur un
même diagramme**

Une seconde approche de classification des exigences est possible. Elle consiste à décrire sur le même diagramme ci-dessous (figure 4) les exigences :

- Du « système à faire ».
- Du « système pour faire ».

Elle **intègre également les exigences d'information**. Ces exigences correspondent aux Exchange Information Requirement (EIR) de l'ISO 19 650 (figure 18) à spécifier par des niveaux de détail de l'information en cours de définition au niveau européen.

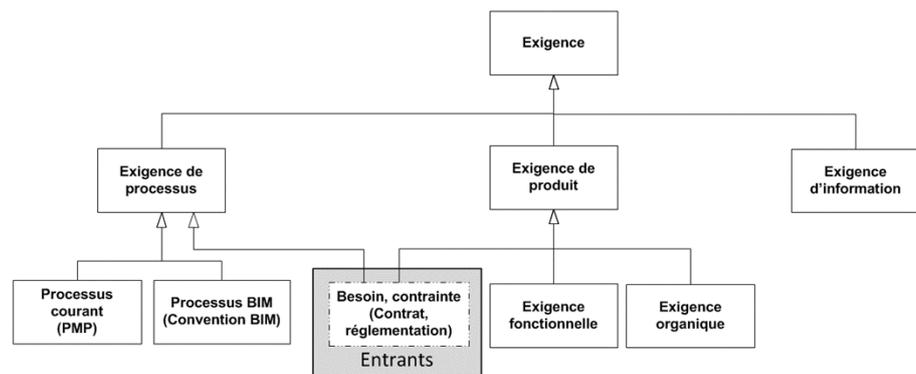


Figure 4 : regroupement des exigences en un diagramme (Badreau, S. et Boulanger, J.-L., 2014) et (Tolmer, 2016)

5.3. Gestion et modélisation des exigences

Vue d'ensemble

Les activités liées aux processus d'IE sont principalement divisées en deux groupes (Badreau & Boulanger, 2014) :

- La modélisation des exigences.
- La gestion des exigences.

Modélisation des exigences

Principales activités

Définir et formaliser un corpus d'exigences...

Lors d'une modélisation des exigences, ces dernières sont :

1. Identifiées.
2. Classées.
3. Hiérarchisées.
4. Éluclidées.
5. Analysées.
6. Spécifiées.
7. Validées.

La modélisation des exigences consiste à définir et formaliser un corpus d'exigences. Traditionnellement, les exigences sont :

- Basées sur du texte.
- Modélisées avec des outils Word®, PDF® ou Excel®.

Cela est d'autant plus le cas dans l'industrie de la construction.

Exemple

Selon les phases du projet, les exigences du client sont généralement regroupées :

- Soit dans un « Programme ».
- Soit dans les CCTP en France (Cahier des clauses techniques particulières).

... pour passer d'une méthode papier à une méthode « modèle »

Les documents peuvent facilement dépasser 1 000 pages pour des projets volumineux et complexes. Cela rend presque impossibles leur vérification, ou le traçage et l'évaluation des impacts d'un changement. La modélisation des exigences consiste donc à passer d'une méthode papier à une méthode « modèle » pour :

- Rédiger des exigences.
- Ajouter des attributs.
- Modéliser des interdépendances entre elles.

Gestion des exigences

Principales activités

Modélisation préalable nécessaire

Outils de gestion des exigences

Lors de la gestion des exigences, nous assistons à leur :

- Stockage.
- Modification.
- Traçage.

La gestion des exigences consiste à :

- Analyser la quantité d'exigences à modéliser.
- Raffiner ces exigences.
- Les vérifier ou les tester.
- Les associer aux personnes responsables de leur traitement.

La gestion des exigences est davantage axée sur la gestion de projet, mais nécessite que les exigences aient été modélisées au préalable.

Cette modélisation peut prendre la forme de métriques, tableaux de bord ou d'interfaces permettant de relier différentes exigences sous diverses formes.

Des outils permettent de gérer les exigences tels que :

- Doors®.
- Reqtify®.
- Visure®.
- Modern Requirements®.

Éviter des interprétations différentes

Concernant les exigences textuelles, le guide publié par le groupe de travail sur les exigences de l'INCOSE (International Council on Systems Engineering, 2015) fait les stipulations suivantes :

Stipulations du groupe de travail sur les exigences de l'INCOSE

Les exigences doivent être « nécessaires, appropriées, sans ambiguïté, complètes, uniques, faisables, vérifiables, correctes et conformes ».

Caractérisation

Cela permet d'éviter des interprétations différentes, pouvant entraîner :

- Des modifications.
- Des dépassements de coût.
- Des retards.
- Une baisse de qualité.

Ces caractéristiques sont similaires au modèle « SMART » pour la formalisation des exigences comme nous allons le présenter dans la partie suivante.

Les exigences doivent au moins être caractérisées par :

- Un identifiant ID.
- Un court texte expliquant le contenu de l'exigence.
- Une attribution.
- Un test de vérification.
- Une référence pour la traçabilité.

Il est également possible d'ajouter d'autres attributs, tels que le risque et le statut (vérifiés, validés, par exemple). Dans l'industrie de la construction, cette méthode et cette discipline sont rarement (et presque jamais) appliquées :

- Aux cahiers des charges.
- Aux documents d'appel d'offres par exemple.

5.4. Exigences « SMART »

Une manière de formaliser les exigences textuelles

Une manière de formaliser les exigences textuelles est le modèle « SMART » :

- **S**pécifique.
- **M**esurable.
- **A**tteignable.
- **R**éaliste.
- **T**raçable.

« S » pour spécifique

Le critère « spécifique » signifie que :

- Les exigences sont simples, claires.
- Ce qui est nécessaire est écrit pour améliorer sa compréhension et éviter toute ambiguïté.
- Les exigences doivent être cohérentes. Les mêmes termes doivent être utilisés pour toutes les exigences lorsque l'on fait référence aux mêmes objets. Par exemple, les termes tels que « clairement », « évidemment », « plusieurs », « certains », etc. doivent être évités lors de la rédaction des exigences.

À terme, l'utilisation d'images, de figures ou de tableaux peut aider à préciser et à améliorer la compréhension des exigences par toutes les parties prenantes.

« M » pour mesurable

Le critère « mesurable » représente la **capacité d'une exigence à être vérifiée et validée lorsque le système est réalisé**. Ainsi, il est nécessaire de définir comment les exigences sont testées au moment de leur définition.

Si l'exigence ne peut pas être testée, cela peut signifier qu'il est nécessaire de la décomposer en sous-exigences qui sont, elles, vérifiables et testables. Une exigence n'est pas vérifiable si :

- Il n'existe pas d'instrument ou d'outil de mesure permettant de tester l'exigence.
- Aucun critère quantifiable n'a été défini pour vérifier l'exigence.

« A » pour atteignable

Le critère « atteignable » signifie que l'exigence **ne dépasse pas les capacités de l'être humain**. Par exemple, une exigence telle que « le système doit être fiable à 100 % » n'est pas possible avec les connaissances actuelles.

« R » pour réaliste

Le critère « réaliste » consiste à prendre en compte :

- Les expériences passées.
- Les retours d'expérience.

Il permet d'évaluer si les besoins ont des chances d'être atteints par le futur système en fonction des ressources disponibles du projet. Il diffère du dernier critère par le fait que l'exigence est réalisable, mais qu'elle nécessiterait d'importantes ressources pour être satisfaite.

Mannion (Mannion & Keepence, 1995) considère que ce critère est le plus difficile à satisfaire pour créer des exigences SMART.

C'est également à ce stade que l'utilité d'une exigence est évaluée. Le niveau d'opportunité d'une exigence peut aider à choisir ou non si une exigence qui nécessite beaucoup de ressources pour le système doit être prise en compte.

« T » pour traçable

Le critère « traçable » (Reliée dans le temps) est la capacité à suivre les exigences dans le cycle de vie du projet :

- De la planification.
- À la réalisation.
- En passant par la vérification.

La traçabilité est plus que la capacité à spécifier la manière dont les exigences sont liées les unes aux autres et comment le système se conforme à quelles exigences. Elle concerne également :

- Les parties prenantes impactées par les exigences définies.
- Quand l'exigence a été créée.
- Quelle est sa criticité.
- Qui l'a créée.
- Qui est responsable de sa vérification.

6. STRUCTURATION DES EXIGENCES PAR L'INGÉNIERIE SYSTÈME

6.1. Qu'est-ce que l'ingénierie système ?

Liens avec l'ingénierie des exigences

Deux domaines initialement séparés...

... mais plus maintenant !

L'ingénierie système et l'ingénierie des exigences étaient au départ deux domaines séparés, même si l'ingénierie système traitait déjà partiellement des exigences. De plus, l'ingénierie des exigences se rencontrait le plus souvent pour des applications orientées logiciels. Elle s'applique maintenant de manière beaucoup plus large à bien d'autres métiers.

Aujourd'hui, la gestion des exigences passe sous l'aile de l'ingénierie système. Cela permet :

- Une plus grande cohérence.
- De lier plus intimement les systèmes et les exigences.

D'arriver plus facilement aux exigences atomiques (indivisibles) et de les affecter à l'objet adéquat. En effet, l'allocation des exigences est fondamentale dans l'approche de l'ingénierie système (Badreau & Boulanger, 2014).

Des interactions plus nombreuses entre systèmes...

Les premiers éléments de la définition de l'ingénierie système sont extraits des propos de D. Krob lors d'une conférence chez l'éditeur de logiciels Dassault Systèmes (Krob, 2014). D. Krob travaille depuis de nombreuses années sur ce sujet à la fois en recherche et en lien avec des industriels. Selon lui, une approche en silos n'est plus possible quand le nombre d'interactions entre systèmes augmente.

... qui nécessitent des changements organisationnels...

Des changements dans la démarche organisationnelle sont nécessaires comme :

- La redéfinition des rôles et des responsabilités.
- La mise en place d'outils informatiques structurants.

Avantages

L'ingénierie système s'intéresse au fonctionnement et dysfonctionnement :

- **Des composants techniques** : système à produire, intégration pour que les composants techniques fonctionnent ensemble.
- **Du projet** : coopération humaine et outils collaboratifs.

Ses avantages sont :

Avantages de l'ingénierie système

Une limitation de l'effort d'ingénierie lorsque la complexité du système augmente

Lorsque le nombre d'interfaces devient important, Krob évoque la relation non linéaire entre :

- L'effort d'ingénierie à fournir que l'on note f .
- La complexité c .

Cette relation est évaluée de manière empirique. Elle prend la forme suivante :

$$f(c) = cn \text{ avec } n > 1 \text{ (classiquement aux alentours de } 1,5)$$

L'ingénierie système permet de :

- Diminuer la valeur de cet exposant n .
- Limiter l'explosion de l'effort d'ingénierie à fournir lors de l'augmentation de la complexité du système.

Avantages de l'ingénierie système

Une simplification du système réel en vue de l'étudier

Un avantage certain de cette approche par les systèmes est que la quasi-totalité des réalisations humaines sont analysables comme des systèmes : il ne s'agit que d'un choix de modélisation (Krob, 2014).

Ainsi, toute activité de conception peut s'approprier cette démarche de modélisation afin de simplifier le système réel afin de l'étudier.

Un cadre conceptuel et méthodologique pour une bonne ingénierie des exigences

L'ingénierie système apporte donc un cadre conceptuel et méthodologique pour une bonne ingénierie des exigences. L'ingénierie système doit par ailleurs :

- Limiter les interfaces entre systèmes (modélisation et donc simplification de la réalité pertinente).
- Faciliter l'allocation et la satisfaction des exigences.

Une application différente selon les auteurs

Différents auteurs ont tenté d'appliquer l'IS au secteur de la construction avec des approches différentes :

| Auteur | Approche |
|-------------|--|
| Whyte, 2016 | Whyte a appliqué les principes de système de systèmes aux projets d'infrastructures afin de mieux gérer leur complexité. Le concept de système de systèmes n'est pas abordé en profondeur dans ce document, mais son application aux infrastructures pourrait apporter des éléments d'analyse pertinents. |
| Chen, 2018 | Chen utilise l'ingénierie système pour utiliser les technologies BIM de façon intégrée sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage de construction. Il insiste sur le besoin d'étendre les recherches sur l'application de l'IS au domaine de la construction. |
| Matar, 2015 | D'autres auteurs comme ont également cherché à utiliser les outils de modéliser offerts par l'ingénierie système (à travers des langages SysML par exemple) pour lier des modèles paramétriques ou fonctionnels à des modèles BIM (Matar, 2015) (Geyer, 2014). |
| Geyer, 2014 | |

Adaptation des concepts d'architecture en partie suivante

Dans la partie suivante, nous proposons d'adapter les concepts d'architecture système (un concept fondamental de l'IS) au domaine de la construction en y intégrant la dimension spatiale de façon à structurer les exigences et les informations des maquettes numériques.

6.2. Architecture des systèmes

Définition

Krob (2014) définit l'architecture des systèmes comme suit :

L'architecture des systèmes selon Krob (2014)

« L'architecture des systèmes (SA) est l'un des principes fondamentaux des méthodes d'ingénierie système. Cela permet de définir les parties invariantes d'un système dans le temps. Il peut être utilisé comme un "pivot" pour la conception de systèmes complexes afin de gérer son évolution, les modifications et les changements apportés au cours de son développement. »

Contribution au développement des systèmes complexes

L'architecture des systèmes est l'activité principale liée à l'ingénierie des systèmes. Krob met en évidence trois problèmes pour lesquels l'architecture de systèmes peut aider au développement des systèmes complexes :

Problèmes pour lesquels l'architecture de systèmes peut aider au développement des systèmes complexes

Absence de recul systémique

Les objectifs QCDP (qualité, coût, délais, prestation) des projets dérivent parfois, car :

- L'analyse du produit au niveau système n'est pas réalisée.
- Les interactions entre le système et son environnement ne sont pas prises en compte avant l'analyse des « détails ».
- Les problèmes au niveau système ne sont pas résolus et peuvent plus tard paralyser le projet.

Barrière de complexité

Il est parfois extrêmement difficile à gérer et maîtriser le nombre :

- De variables système.
- D'effets émergents.
- D'interfaces.
- D'acteurs de gestion de projet
- De technologies utilisées.

Mauvaise gestion des interfaces

La plupart des problèmes d'intégration proviennent d'une mauvaise gestion des interfaces. La définition des interfaces internes et externes est au cœur des activités d'architecture des systèmes.

La méthode d'architecture système consiste à identifier, partager et enfin négocier des interfaces techniques et humaines entre les acteurs du projet.

Point commun avec l'architecture dans l'industrie de la construction

Il est intéressant de noter que Krob compare l'architecture des systèmes et l'architecture dans l'industrie de la construction.

L'architecture (tant dans l'IS que dans l'industrie AEC²) consiste dans les deux cas à définir les parties invariantes d'un système, que ce soit pour un bâtiment ou un autre système.

² AEC : architecture engineering construction.

Distinction entre le domaine du problème...

... et le domaine de la solution

L'un des principes les plus importants de l'ingénierie des systèmes et qui est l'objectif de l'architecture système est de séparer le domaine du problème de celui de la solution.

Krob (2009) les distingue comme suit :

| | |
|-------------------------------|--|
| Domaine du problème | Le domaine du problème consiste à définir les missions du système, pourquoi il doit être réalisé. Le système peut être représenté comme une boîte noire. |
| Domaine de la solution | Le domaine de la solution consiste à définir : <ul style="list-style-type: none"> • Ce que fait le système. • Comment il est constitué. Le système peut être représenté comme une boîte blanche : ses composants sont définis et caractérisés. |

... et le domaine des besoins

Pollet (2007) distingue les domaines du problème de celui des besoins comme suit :

| | |
|----------------------------|--|
| Domaine du problème | Les problèmes sont liés au « quoi », à ce que le système devrait pouvoir faire pour répondre aux besoins sans définir le « comment ». |
| Domaine des besoins | Les besoins concernent le « pourquoi », à savoir : <ul style="list-style-type: none"> • Les attentes du client/utilisateur du futur système. • Les contraintes liées aux besoins identifiés. |

Décomposition en quatre phases

De manière générale l'architecture système peut être séparée en quatre phases :

| Phase | Action |
|--|---|
| 1. Étude de l'environnement du système | La première étape consiste toujours à définir des éléments de l'environnement du système. Tous les éléments externes avec lesquels le système est en interaction sont identifiés et caractérisés. |
| 2. Vue opérationnelle (externe) | Dans la vue opérationnelle, les missions du système (besoins) sont identifiées et analysées. Dans cette perspective, il faut répondre aux questions : <ul style="list-style-type: none"> • Pourquoi le système doit-il être réalisé ? • Quel est son but ? |
| 3. Vue fonctionnelle (interne) | Les fonctions du système répondent aux besoins auxquels ce dernier doit répondre. Dans la vue fonctionnelle, les fonctions sont identifiées et caractérisées. Les fonctions du système sont ce que le système fait réellement dans l'espace et dans le temps. Elles indiquent ce que fait réellement le système, indépendamment de la manière dont il est construit ou composé. |
| 4. Vue organique/physique (interne) | La vue organique consiste à définir de quoi le système est composé et comment sont agencés : <ul style="list-style-type: none"> • Les matériaux. • Les logiciels. • Les éléments humains. • Leur géométrie. Cette vue répond à la question « de quoi le système est-il constitué ? » |

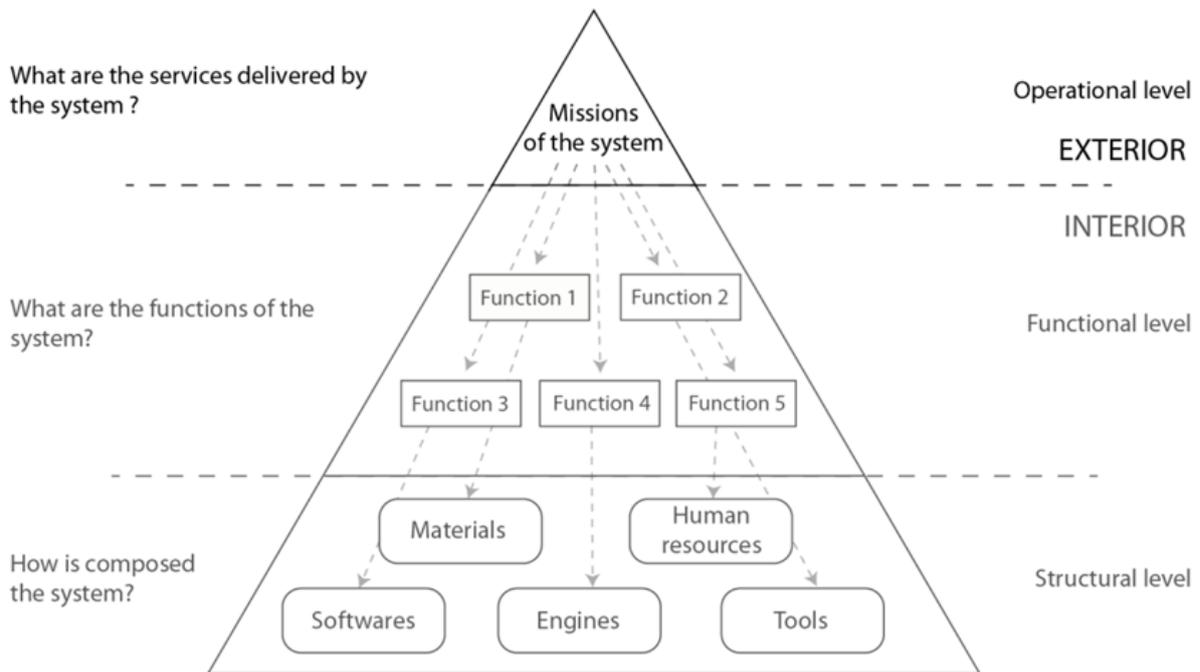


Figure 5 : cadre universel pour l'architecture de systèmes réels (Krob, 2009). Cette figure représente les 3 niveaux d'architecture système (opérationnel, fonctionnel, organique).

Hierarchie systémique

Un système est caractérisé par une hiérarchie systémique (système, sous-systèmes, sous-sous-systèmes, etc.). Les différentes vues architecturales (opérationnelle, fonctionnelle, organique) sont également applicables aux différents niveaux systémiques d'un système.

En ajoutant cette caractéristique systémique, il est possible de résumer l'architecture d'un système par le « cube systémique » présenté dans la figure 6.

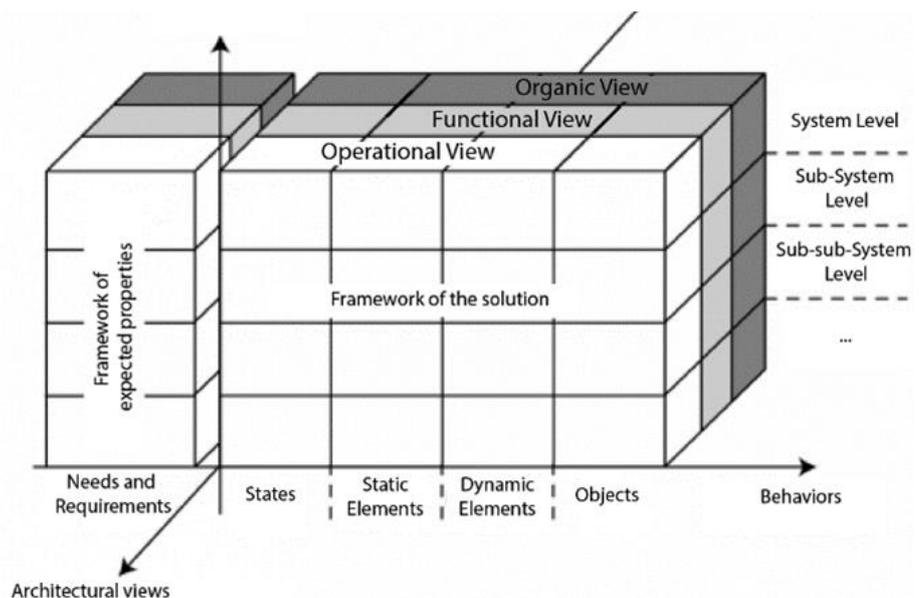


Figure 6 : « cube systémique » pour l'architecture d'un système (Krob, Élément de systémique. Architecture des systèmes., 2014)

Processus récursif d'analyse systémique et de modélisation

Comme présenté dans la figure 7, le processus qui consiste à définir l'architecture d'un système est récursif.

En effet, de nouveaux éléments de la vue opérationnelle peuvent être identifiés pendant l'analyse de la vue organique, même si cela doit être évité.

Exemple

L'analyse de la géométrie de l'ouvrage ayant lieu dans la vue organique peut amener à l'identification de nouvelles interactions entre le système et son environnement. Or, l'analyse des interactions entre le système et son environnement se fait normalement dans la vue opérationnelle.

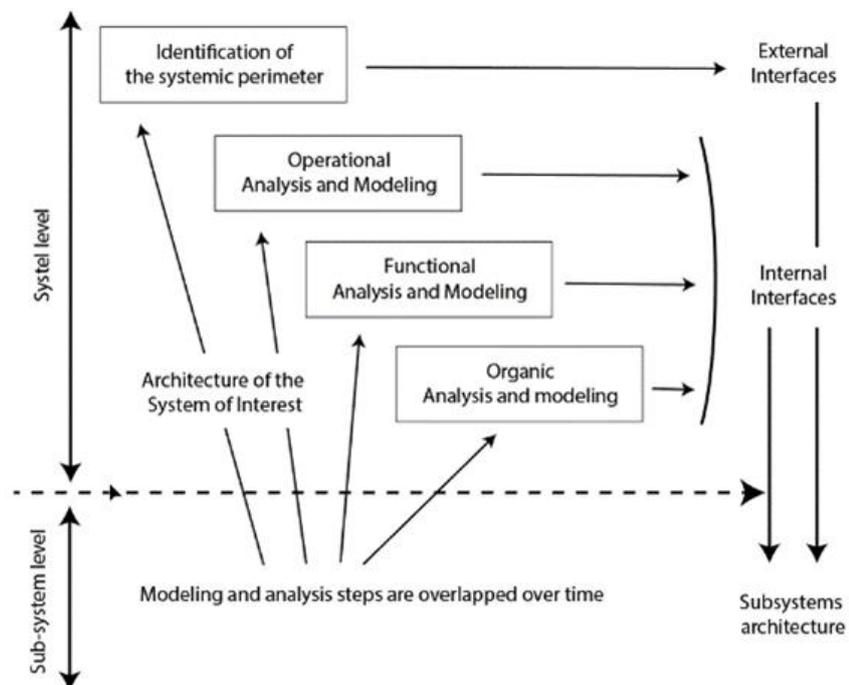


Figure 7 : processus récursif d'analyse systémique et de modélisation (Krob, 2009)

Autres méthodes d'architecture utilisées

Méthode de Fiorèse et Meinadier

D'autres méthodes d'architecture existent pour analyser et modéliser des systèmes complexes.

Fiorèse et Meinadier (2012) utilisent la même méthode d'architecture est utilisée.

La seule différence provient de la séparation des vues opérationnelle et fonctionnelle entre les éléments statiques et dynamiques, comme illustré à la figure 8.

| | |
|-----------------------------------|--|
| Pour la vue opérationnelle | Les éléments statiques consistent à modéliser le système avec ses interactions avec l'environnement. Les éléments dynamiques sont les évolutions des missions du système dans le temps. |
| Pour la vue fonctionnelle | Les éléments statiques consistent à modéliser les fonctions du système et leur relation en termes d'entrées et de sorties. La vue dynamique modélise la manière dont les fonctions du système sont liées dans le temps. |

Méthode de Fiorèse
et Meinadier

La méthode de Fiorèse et Meinadier est schématisée comme suit :

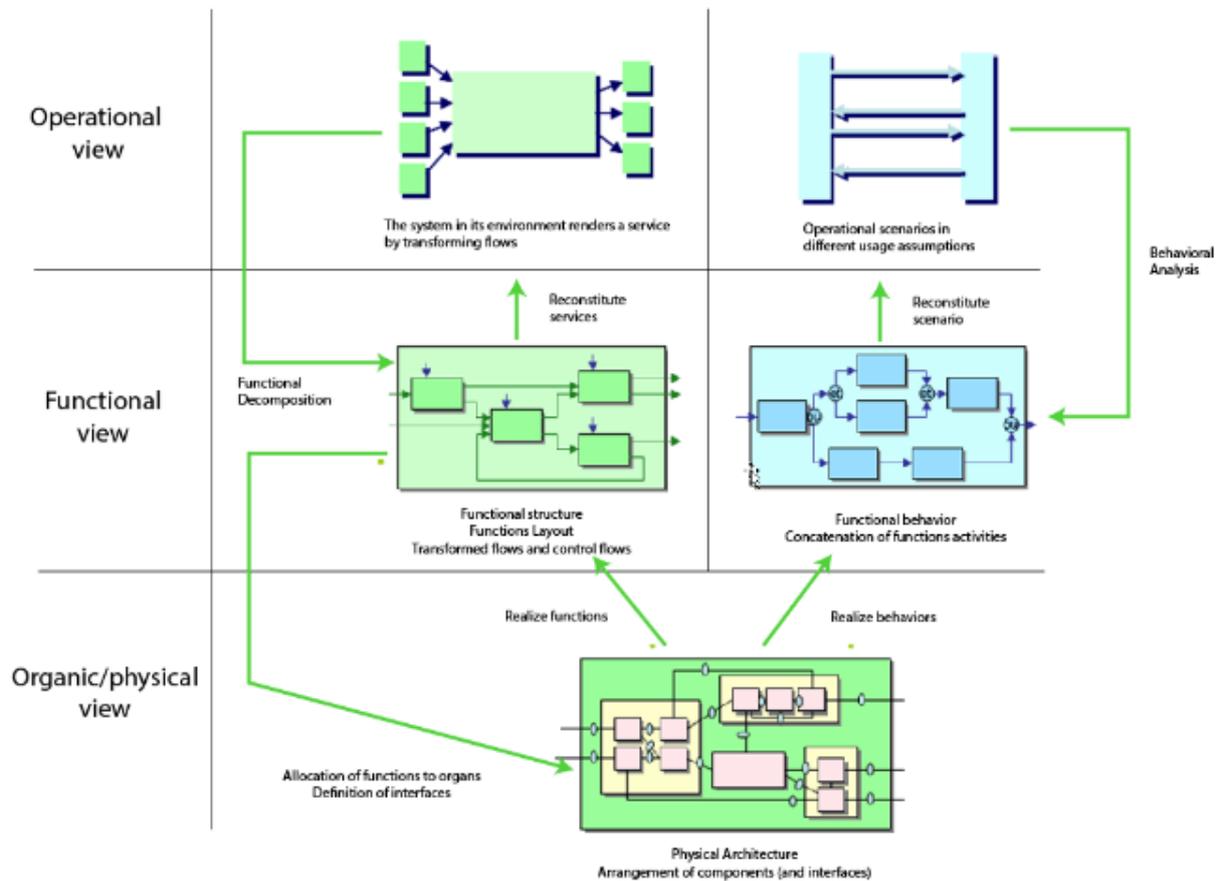


Figure 8 : vues principales d'un système industriel (Fiorèse & Meinadier, 2012).
Sur cette figure, sont également représentées les 3 vues architecturales différentes d'un système (en ligne) et les comportements du système en colonne.

Méthode SAGACE

Dans la méthode SAGACE, les mêmes principes d'architecture (opérationnel, fonctionnel et organique) sont présentés, mais les vues diffèrent. En effet, Feliot (1997) identifie les vues :

- **Achronique** : indépendant des éléments temporels.
- **Synchronique** : éléments évoluant dans le temps.
- **Diachronique** : éléments évoluant dans le temps.

6.3. Intégration de l'espace dans l'ingénierie système

Vue d'ensemble

Des activités liées à l'espace...

Dans le domaine de la construction, les systèmes que nous réalisons ont pour but d'adapter l'espace aux activités humaines ou qui y sont connexes. Par conséquent, la plupart des activités des ingénieurs, des architectes et des urbanistes sont liées à « l'espace » :

- Les espaces fonctionnels.
- La géométrie.
- Les calculs de structure.
- Les calculs de confort (acoustique, éclairage, débits, etc.).
- La résistance des matériaux.

Toutes ces activités sont liées :

- À la manière dont les éléments du système sont organisés dans l'espace.
- À leur forme.
- À leur géométrie.
- Aux distances entre les objets (topologie).
- À la description du phénomène dans l'espace.

... dont il faut gérer la complexité...

La complexité survient lorsque différentes disciplines sont impliquées dans la conception du même système. Cet effet se produit dans les projets de construction lorsque le système à concevoir doit :

- Répondre à différents besoins.
- Gérer différentes fonctions dans l'espace.
- Présenter une géométrie complexe et plusieurs interactions (spatiales), ce qui augmente le nombre de spécialités impliquées.

... en intégrant l'espace dans l'ingénierie système

Nous intégrons l'espace dans la méthodologie issue de l'IS que nous développons. Cela vise à aider les concepteurs et les architectes à gérer la complexité du développement de tels systèmes :

- D'un niveau élevé d'abstraction.
- À la définition d'éléments très concrets.

L'une des particularités des systèmes du secteur de la construction provient de la prise en compte de l'espace dans son développement. L'adaptation de l'ingénierie des systèmes pour les infrastructures et même les bâtiments devrait donc intégrer cette particularité dans les méthodes et les concepts.

La question est : **comment et où intégrer l'espace dans les méthodologies d'ingénierie des systèmes ?**

Méthodologie d'intégration de l'espace dans l'IS

Notre démarche

En premier lieu, il est important de souligner que la définition des systèmes dans l'espace est déjà prise en compte dans les projets de construction actuels à tous les niveaux systémiques. L'espace est au cœur de ces outils et méthodes :

- De la définition des plans directeurs d'urbanisme.
- Aux maquettes numériques de bâtiments ou d'infrastructures.

Notre démarche n'est pas ici de décrire de nouveaux moyens d'analyser un système dans l'espace. Elle vise à écrire comment ces analyses peuvent être intégrées dans l'ingénierie système.

Un espace nécessaire pour spécifier tout comportement fonctionnel...

... qui a un impact important sur les systèmes spatiaux

Types d'espaces pris en compte

Ni le manuel de l'INCOSE ni le manuel de l'AFIS ne décrivent comment l'espace est considéré dans les méthodologies d'ingénierie des systèmes. Seul le guide CESAME (CESAMES, 2017) mentionne brièvement l'espace :

Mention de l'espace dans le guide CESAME (2017)

« L'espace et le temps sont toujours nécessaires pour spécifier tout comportement fonctionnel (qui se déroule "fonctionnellement quelque part" à un certain moment) »

Cependant, le même guide mentionne également que « l'espace fonctionnel » peut être décrit avec des diagrammes d'interaction et des fonctions.

Cette décomposition ne suffit pas pour modéliser tous les phénomènes spatiaux.

Voiron (2005) souligne que l'espace n'est pas considéré dans la plupart des analyses systémiques. Il est pourtant fondamental pour la description des systèmes spatiaux, car il a un impact important sur leur dynamique.

Le concept d'espace dans les différentes étapes de développement des produits de construction a été étudié par Mauger (Mauger, 2015) dans le cas des bâtiments. En programmation architecturale, trois types d'espace sont pris en compte :

| | |
|---------------------------|--|
| Espace fonctionnel | L'espace fonctionnel fait référence à l'espace requis par le client. |
| Espace prévu | L'espace prévu est l'espace quantifié par le « programmeur » en considérant les flux : <ul style="list-style-type: none"> • De personnes. • De ressources. • D'activités/travaux réalisés dans le bâtiment. |
| Espace conçu | L'espace conçu est l'espace défini par des architectes et des ingénieurs dans les propositions de projet. |

Un espace à la fois concret et abstrait...

... dont il faut prendre en compte les caractéristiques physiques...

Selon Dursun (2012), l'espace est simultanément :

- Un concept très concret qui peut être décrit par :
 - La longueur.
 - La largeur.
 - L'échelle.
 - La géométrie.
 - La topologie.
 - Etc.
- Un concept très abstrait et complexe très difficile à formaliser, par exemple les relations sociales. Ces derniers aspects sont plus difficiles à mesurer, plus abstraits et en quelque sorte « invisibles ».

Dans sa thèse, Mauger considère uniquement les caractéristiques physiques de l'espace :

Considération de l'espace selon Mauger (2015)

« En conséquence, seules les propriétés physiques sont incluses dans le concept d'espace alors que la logique (fonctionnelle) derrière l'espace est reportée à la notion d'activité. »

Par conséquent, **l'espace n'est considéré que pour ses propriétés géométriques et topologiques**. Mauger situe l'espace à un « faible » niveau d'abstraction en termes de besoins et d'exigences (figure 9).

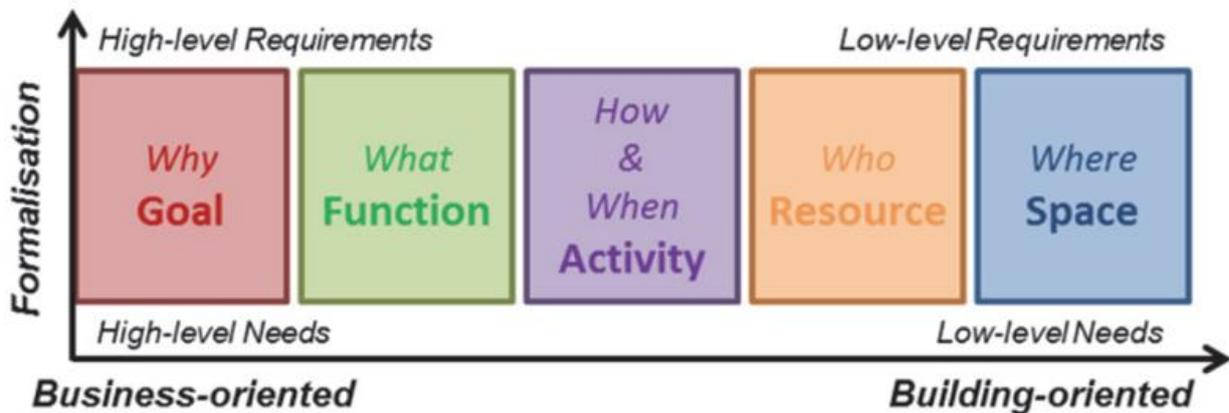


Figure 9 : relations entre espace, objectifs, fonctions, activités et ressources (Mauger, 2015)

... sans oublier
les interactions
spatiales plus abstraites !

Cependant, lorsqu'on considère les interactions spatiales logiques entre les systèmes (activités), il devient nécessaire de modéliser les interactions spatiales à un niveau d'abstraction plus élevé.

Intégration de l'espace...

Les besoins (vue opérationnelle) et les fonctions (vue fonctionnelle) d'un système peuvent être attribués à un ou des espace(s).

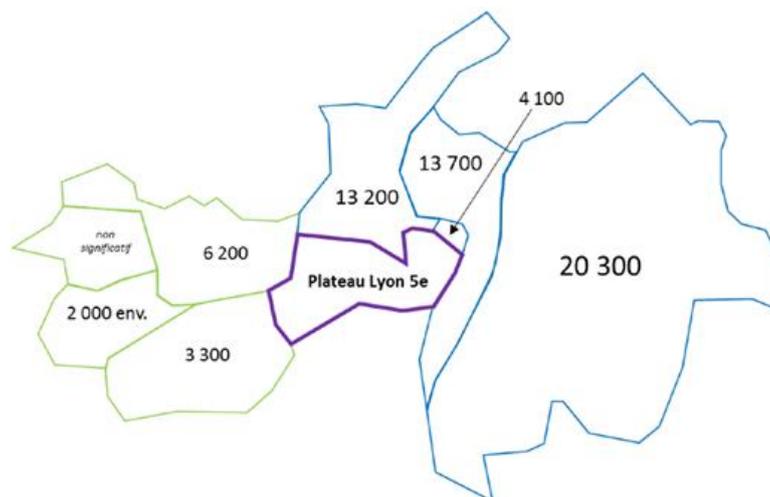
Ces espaces ne sont pas nécessairement identiques à la description géométrique et topologique du système, comme nous allons le voir.

... dans la vue
opérationnelle

Prenons l'exemple au niveau opérationnel d'une infrastructure de métro : la future ligne E du métro lyonnais. Les objectifs et les besoins d'un système de métro sont d'améliorer la mobilité et l'accessibilité entre plusieurs quartiers d'une ville. Il est donc nécessaire de modéliser :

- Où sont les habitants de l'agglomération lyonnaise.
- Leur nombre.
- Où ils veulent aller pour répondre à leurs besoins.
- Les espaces impactés pour décrire et modéliser sont des zones de la ville.

Dans les études de la 5e ligne du métro de Lyon, une analyse des besoins en mobilité dans le 5e arrondissement a été réalisée. Elle est illustrée sur la carte ci-après.

Figure 10 : analyse des besoins de mobilité dans le 5^e arrondissement de Lyon

... dans la vue fonctionnelle

Au niveau fonctionnel, il est également possible de considérer l'espace, c'est-à-dire de définir ce que le système « fait » dans l'espace.

Par exemple, pour un système de métro, deux fonctions essentielles (ce que le système fait) sont de :

- Transporter les gens. • Accéder au système.

Ces fonctions sont intimement liées à l'espace. En effet :

- La fonction de transport de personnes n'a de sens que si sont atteints :
 - Un point de départ.
 - Un point de destination.
 - Plusieurs autres points de desserte dans l'espace.
- De la même manière, la fonction « Accès au système » n'a aucun sens si elle n'est pas décrite dans l'espace : emplacement et zones de chalandise des points d'accès.

Dans l'exemple ci-après, une allocation possible des deux fonctions « Transporter des personnes » et « Accéder au système » dans l'espace est illustrée.



Figure 11 : fonctions « Transporter des personnes » et « Accéder au système » de la 5e ligne de métro de Lyon pour les deux scénarios sélectionnés

Ces 2 exemples montrent :

- Qu'il est non seulement tout à fait possible de prendre en compte l'espace au niveau d'abstraction fonctionnel et opérationnel.
- Que cela est indispensable dans l'analyse d'un système du domaine de la construction.

En effet, la description spatiale des besoins et des fonctions permet :

- De préciser les performances auxquelles le système doit répondre.
- D'analyser les impacts opérationnels et fonctionnels du système avec son environnement à un haut niveau d'abstraction.

... dans la vue organique

Au niveau organique, **le système est décomposé en éléments concrets qui permettent d'assurer les fonctions préalablement définies** (le « comment »).

Par exemple, dans le cas du 5e métro ligne de Lyon, il faut définir un espace permettant le transport de personnes (fonction définie précédemment). Dans le cas présent, il s'agit d'un tunnel souterrain. Ce tunnel peut être décrit dans l'espace du référentiel géographique de la ville de Lyon (figure 12).

... dans la vue organique

De manière similaire, les stations du métro peuvent être considérées comme des éléments organiques du métro au niveau système répondant à la fonction « accéder au système ». Les stations sont aussi représentées spatialement sur la figure 12.



Figure 12 : description organique (alignement) du tunnel de la 5e ligne de métro de Lyon au niveau du système

Implications

L'intégration de l'espace dans la vue opérationnelle, fonctionnelle et organique a plusieurs implications :

| Implications |
|---|
| Les besoins, les fonctions et les composants d'un système du domaine de la construction peuvent être alloués à un niveau d'abstraction élevé à des espaces. |
| Les espaces impliqués dans la dynamique du système ne sont pas les mêmes en fonction de la vue considérée (opérationnelle, fonctionnelle ou organique). |
| Les espaces opérationnels, fonctionnels ou organiques peuvent : <ul style="list-style-type: none"> • Soit se chevaucher, se recouper, se superposer. • Soit être complètement disjoints et différents. |
| Plus nous entrons dans la modélisation concrète du système, plus c'est l'espace physique qui est en interaction avec le système. Dans l'exemple présenté ci-avant : <ul style="list-style-type: none"> • Les exigences opérationnelles sont davantage liées à l'espace humain, à savoir la mobilité entre les arrondissements administratifs de Lyon. • À l'inverse, dans la vue organique, il est important de représenter la topographie et les espaces bâtis anthropiques. |

Une indépendance de l'espace du niveau systémique et d'abstraction...

L'espace n'est pas lié à une hiérarchie systémique. En effet, quel que soit le niveau systémique considéré, **un système existe toujours « dans » de l'espace.**

| Exemple |
|--|
| Les tunnels et les stations présents dans la figure 12 pourraient être beaucoup plus finement détaillés dans l'espace. Nous pourrions représenter la position exacte : <ul style="list-style-type: none"> • Des parois mou-lées. • Des voussoirs dans les tunnels. • Etc. |

L'espace est indépendant :

- Du niveau systémique (système, sous-système, composant).
- Du niveau d'abstraction (vues opérationnelles, fonctionnelles, organiques).

... qui implique d'adapter le cube systémique...

Ainsi, le cube systémique (Krob, *Éléments de systémique. Architecture des systèmes.*, 2014) peut être adapté en ajoutant une colonne « espace » perpendiculaire aux 2 autres dans l'axe des « comportements » (figure 13).

Ce comportement est essentiel à l'application de l'IS dans le secteur de la construction. Cependant, nous n'excluons pas qu'elle puisse aussi être utile pour d'autres systèmes. La seule différence est que les « besoins » des autres systèmes ne sont pas nécessairement liés à l'espace.

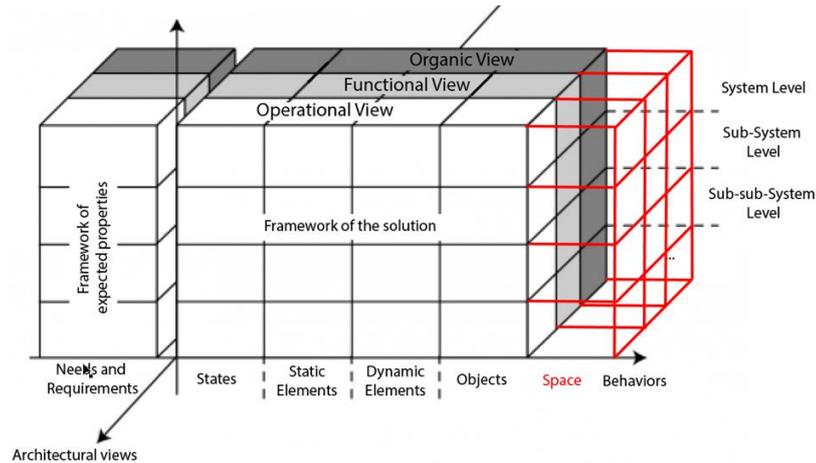


Figure 13 : ajout de l'« espace » dans le « cube systémique ». L'espace est ajouté en tant que « comportement » du système, car il est perpendiculaire aux niveaux systémiques et aux vues architecturales.

... de prendre en compte l'espace dans les trois vues architecturales...

Habituellement, les interactions entre le système et son environnement n'étaient effectuées qu'« avant » l'analyse opérationnelle, comme l'indique la figure 7.

La prise en compte de l'espace dans les trois vues architecturales n'est pas neutre dans la méthode. En effet, **les espaces impactés ne sont pas nécessairement les mêmes entre les différentes vues**. Cela signifie que selon les vues architecturales, des éléments différents de l'environnement peuvent interagir avec le futur système.

Ces nouvelles interactions proviennent du fait que différents espaces sont impactés de différentes manières selon les vues architecturales.

Par rapport à la méthode classique d'analyse fonctionnelle, il est nécessaire d'analyser les interactions entre le système et son environnement à chacune des phases :

- Analyse du besoin.
- Analyse des fonctions.
- Analyse organique.

Dans la méthode classique, seule l'analyse du besoin consistait à étudier les liens entre le système et son environnement.

... et à chacune des phases

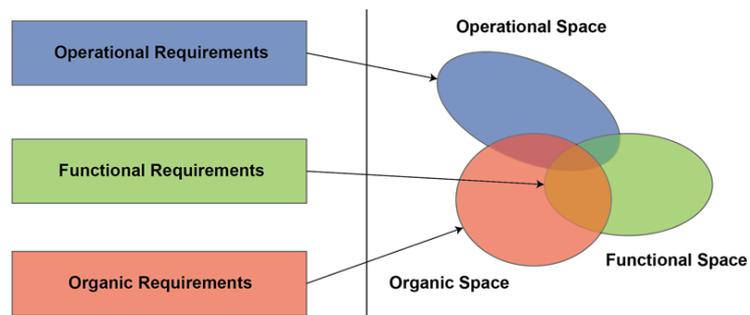


Figure 14 : exigences opérationnelles, fonctionnelles et organiques avec leurs espaces alloués

6.4. « Système à faire » et « systèmes pour faire »

Distinction selon le manuel de l'INCOSE

En ingénierie systèmes, une distinction importante est faite entre le « système à faire » (System of Interest) et les « systèmes pour faire » (Enabling System). Le manuel de l'INCOSE (2015) les distingue comme suit :

Distinction selon le manuel de l'INCOSE (2015)

« Les systèmes pour faire sont des systèmes qui permettent les activités du cycle de vie du système à faire. Les systèmes pour faire fournissent les services nécessaires au système à faire pendant un ou plusieurs étapes du cycle de vie, bien que les systèmes pour faire ne constituent pas un élément direct de l'environnement opérationnel. Les exemples de systèmes pour faire incluent les systèmes de conception, les systèmes de production, la logistique, les systèmes de support, etc. »

Application des principes d'ingénierie systèmes

Selon l'AFIS (Association française d'ingénierie système, 2009), le système à faire est considéré comme le système qui est étudié et réalisé ultérieurement.

Comme le montre la figure 16, les principes d'ingénierie systèmes peuvent être appliqués à la fois :

- Sur le « système à faire ».
- Et sur les « systèmes pour faire ».

| L'application des principes d'IS... | Conduit... |
|-------------------------------------|--|
| ... sur le « système pour faire » | ... à l'analyse des activités de gestion et de planification de projet. |
| ... sur le « système à faire » | ... à la définition du système à construire, à savoir ses : <ul style="list-style-type: none"> • Be-soins. • Fonctions. • Composants. |

Relations du « système à faire » et du « système pour faire »

Liens avec le système à réaliser

Le « système pour faire » est considéré comme l'ensemble des systèmes (ressources humaines, activités, informations, etc.) nécessaires au développement du système :

- Depuis la conception.
- Jusqu'à la réalisation, le déploiement et la mise en service.

Dans le secteur de la construction, cette distinction est fondamentale. En effet, le « système à faire » et le « système pour faire » changent à chaque système à développer. De plus, le « système à faire » est unique, à l'instar des systèmes supports nécessaires à son développement.

La figure 15 ci-après représente :

| | |
|------------------|---|
| Au centre | Le système à réaliser. Il s'agit du futur produit. |
| Autour | Les différents « systèmes pour faire » nécessaires à son développement et en interaction avec le « système à construire » ou « système à faire ». |
| | Les interactions entre les systèmes d'activation eux-mêmes. |

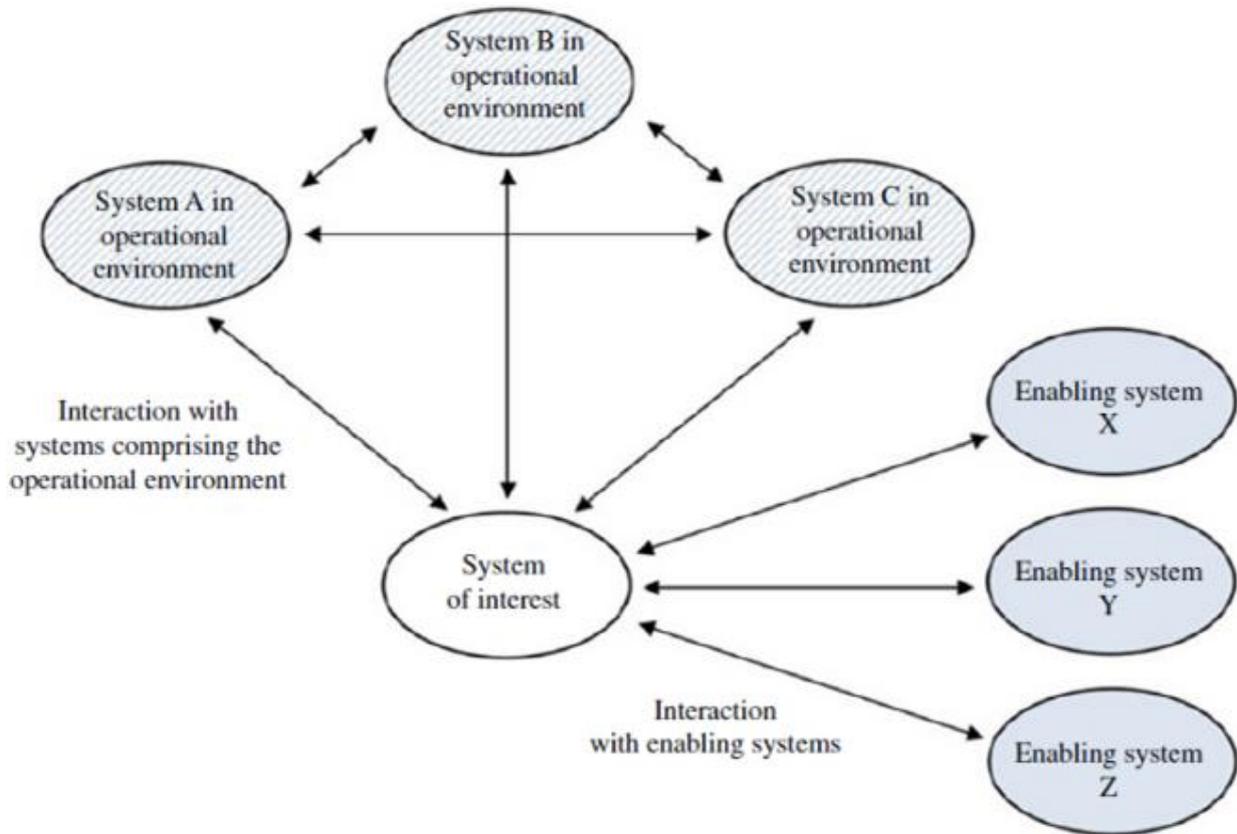


Figure 15 : « système à faire », environnement opérationnel et « systèmes pour faire » (ISO/IEC/IEEE, 2015)

Influence mutuelle

Les deux systèmes sont en relation. En effet, la définition des éléments du « système à faire » a inévitablement des conséquences sur les activités des « systèmes pour faire » telles que :

- La modélisation.
- La simulation.
- La sous-traitance.
- La vérification des activités.

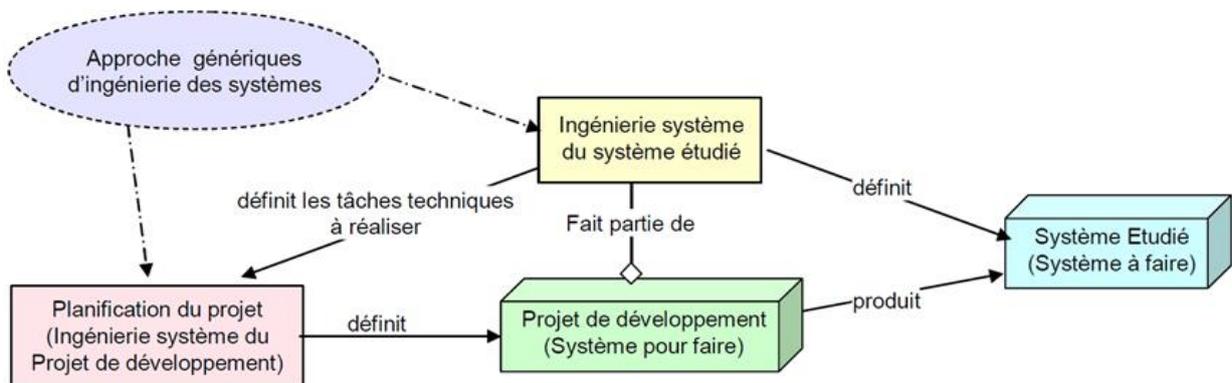


Figure 16 : relation entre l'IS, le « système à faire » et le « système pour faire » AFIS (2009)

Influence mutuelle

Krob (2009) différencie également :

- Le système industriel (système à faire) à construire.
- Le système facilitant sa conception et sa réalisation (système pour faire).

Ces deux systèmes ne sont pas indépendants. Ils s'influencent mutuellement comme nous pouvons le voir sur la figure 17. Cette figure montre :

- Qu'il existe des interactions entre les systèmes techniques du « système à faire » et le système « humain » du « système pour faire » requis pour son développement (planification, conception, réalisation et fonctionnement).
- Qu'il est nécessaire d'avoir un « architecte système » dans le système humain pour assurer l'intégration des systèmes techniques.

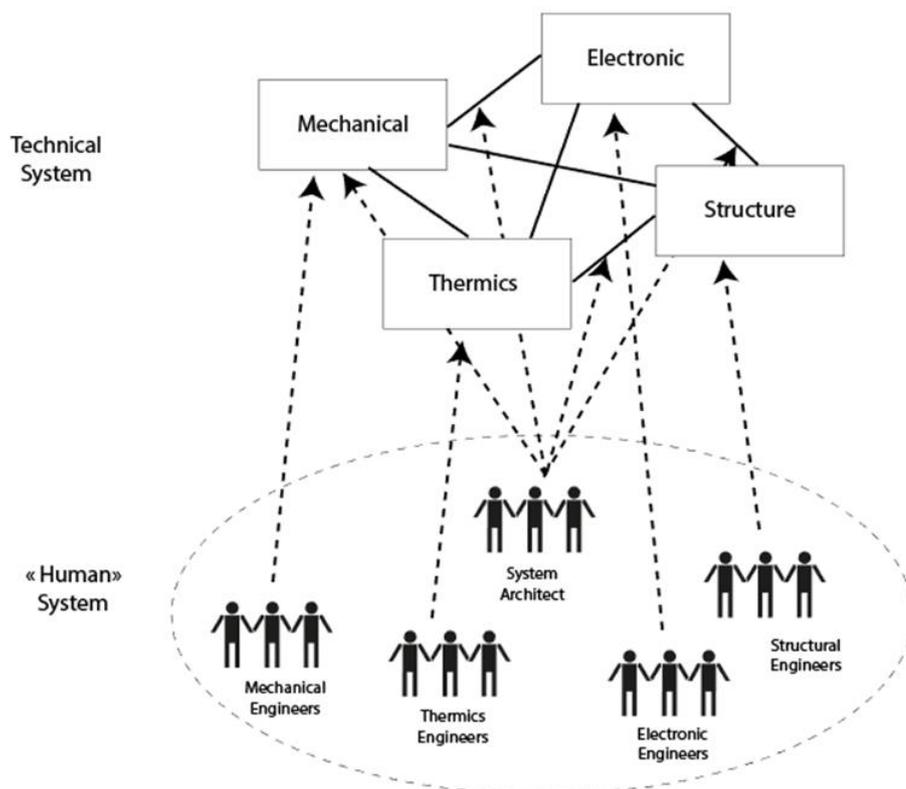


Figure 17 : système humain et système technique impliqués dans un projet de système industriel (Krob, 2009)

Des liens et interactions qui nécessitent une étude approfondie

Cependant, les liens et les interactions entre le « système à faire » et les « systèmes pour faire » n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie dans la littérature.

Des problèmes doivent encore être analysés tels que :

- Les impacts sur le produit des modifications apportées au projet.
- La manière d'évaluer si les « systèmes pour faire » sont bien adaptés pour développer le « système à faire ».

Différence de définition du « système pour faire »

Nous pouvons souligner une différence dans la définition du « système pour faire » entre Krop et le manuel de l'INCOSE :

| | |
|------------------------------------|--|
| Selon Krop | Krop considère uniquement le « système pour faire » comme le système humain responsable de la conception du « système à faire ». |
| Selon le manuel de l'INCOSE | Le manuel de l'INCOSE considère également la production ainsi que les systèmes logistiques et d'appui nécessaires à son développement. |



Dans le présent document, nous examinons la définition du manuel de l'INCOSE, à savoir le système humain ainsi que les systèmes de production, de logistique et de soutien nécessaires au développement du « système à faire ».

Distinction selon l'ISO 19650

Dans la norme ISO 19650 (ISO, 2018), les mêmes concepts de « système pour faire » et de « système à faire » sont utilisés pour décrire les échanges d'informations (figure 18) :

- Le système pour faire est appelé le « **projet** ».
- Le « système à faire » est appelé le « **produit** ».

Des types d'exigences différentes selon le système...

Cette figure illustre bien également qu'il existe différents types d'exigences :

- Certaines issues du « système à faire ».
- D'autres issues du « système pour faire ».

| | |
|---|--|
| Exigences issues du « système à faire » | Les exigences du « système pour faire » permettent de modéliser : <ul style="list-style-type: none"> • Le projet. • Les échanges d'informations (informations portant sur le « système à faire » notamment). |
| Exigences issues du « système pour faire » | À l'inverse les exigences portant sur le « système à faire » permettent de structurer le produit final (ou Asset) à réaliser. |

... à prendre en compte

Il faut prendre en compte ces deux types d'exigences **pour réaliser un projet qui fonctionne.**

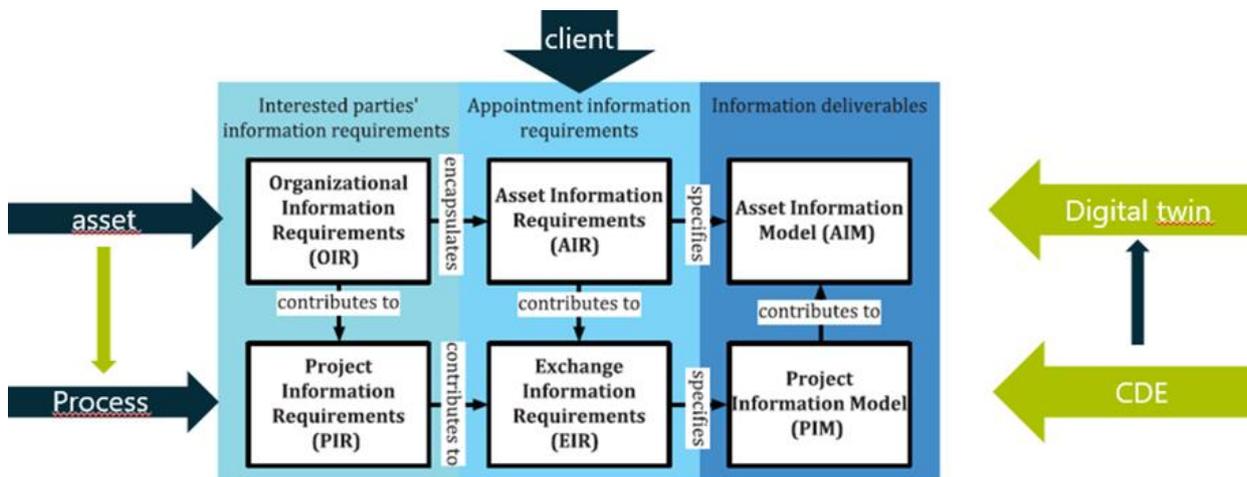


Figure 18 : « système pour faire » et « système à faire » selon l'ISO 19650 (ISO, 2018)

6.5. Cycle en V

Vue d'ensemble

Des échanges d'informations dans le cycle de vie du système...

... développés selon des « métamodèles »...

... dont le cycle en V...

Nous venons d'identifier :

- Comment prendre en compte l'espace dans les méthodes de l'IS.
- La distinction entre « système à faire » et « système pour faire » et l'intérêt d'étudier les relations entre ces différents systèmes.

Il nous reste maintenant à voir **comment organiser les échanges d'informations dans le cycle de vie du système.**

Pour cela, des « méta-modèles » ont été développés :

- Le cycle en V.
- Le cycle en spirale.
- Le cycle en cascade.

Ces « métamodèles » font partie des concepts de l'ingénierie système.

Dans le présent document, nous nous concentrons essentiellement sur l'un d'eux, à savoir le cycle en V.

Le cycle en V (figure 19) est **l'un des métamodèles le plus connus pour le développement de systèmes artificiels.**

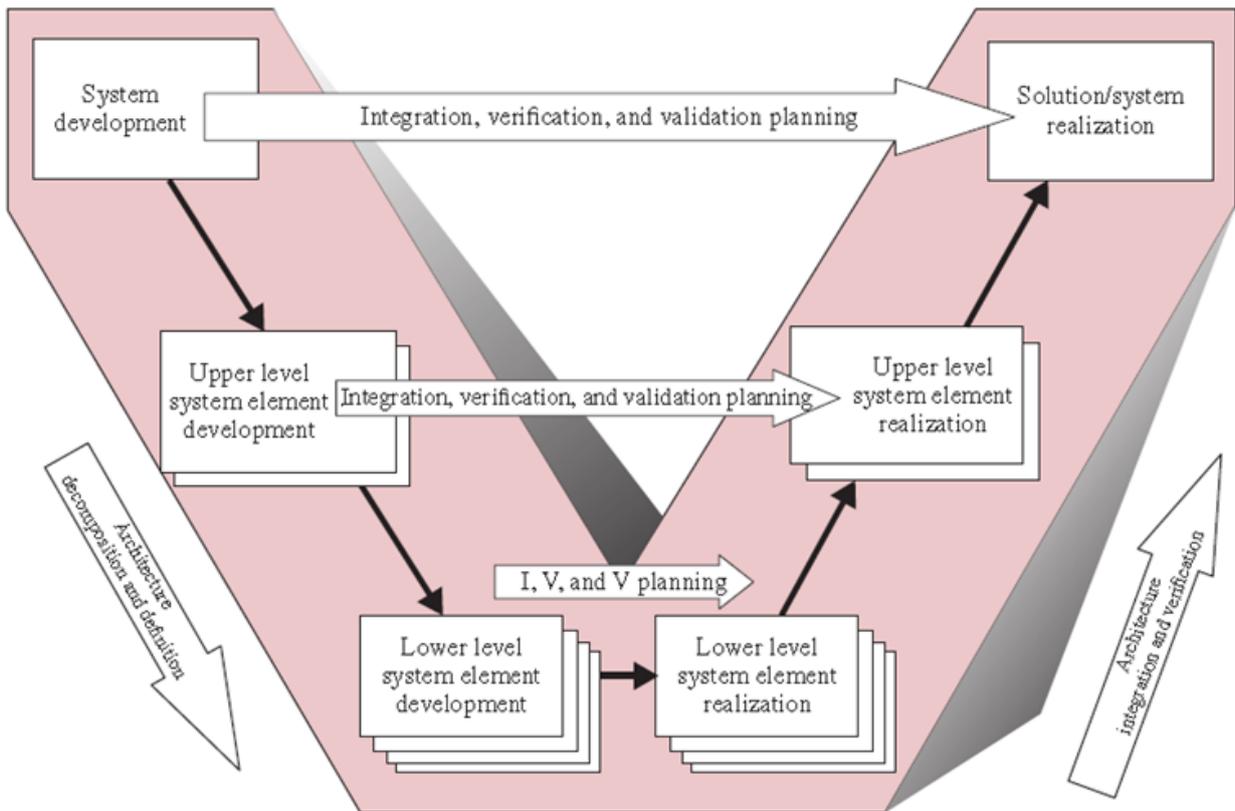


Figure 19 : développement du cycle de vie du modèle en V (Forsberg & Mooz, 1992)

... dont la principale caractéristique est son approche systémique

L'une des principales caractéristiques du métamodèle en V est l'approche systémique du développement du système. En effet, le produit est considéré comme un système composé de :

- Sous-systèmes.
- Composants.
- Sous-sous-systèmes.
- Etc.

Ces éléments sont développés tout au long du processus de développement.

Déroulé et description des branches du V

Départ en haut de la branche à gauche du V...

... le long de laquelle nous descendons...

... pour ensuite monter dans la branche droite

Description de la partie gauche

Dans le cycle en V, le déroulé et la maturité du projet évoluent du côté gauche pour aller au côté droit du diagramme.

Le projet commence par la branche en haut à gauche du V où :

- Les exigences système sont définies.
- Les contraintes liées à son intégration, sa vérification et sa validation sont prises en compte.

Les sous-systèmes sont décrits de la même manière lors de la descente dans la branche de gauche. Aussi, les exigences sont affinées à partir du niveau supérieur.

Dans la branche droite montante :

- Les composants sont réalisés.
- Le sous-système est assemblé.
- Le système est intégré.

La partie gauche du cycle en V représente les **différents niveaux de développement systémique du produit** :

- Du niveau système situé en haut de la partie gauche.
- Aux composants situés en bas.

À chaque niveau systémique, les exigences que le système couvre sont définies. Lorsque les exigences sont définies, la manière dont elles sont vérifiées et validées dans la partie droite du cycle en V est également décrite.

Ce processus est conforme à la formalisation des exigences de type « SMART » décrite plus haut.

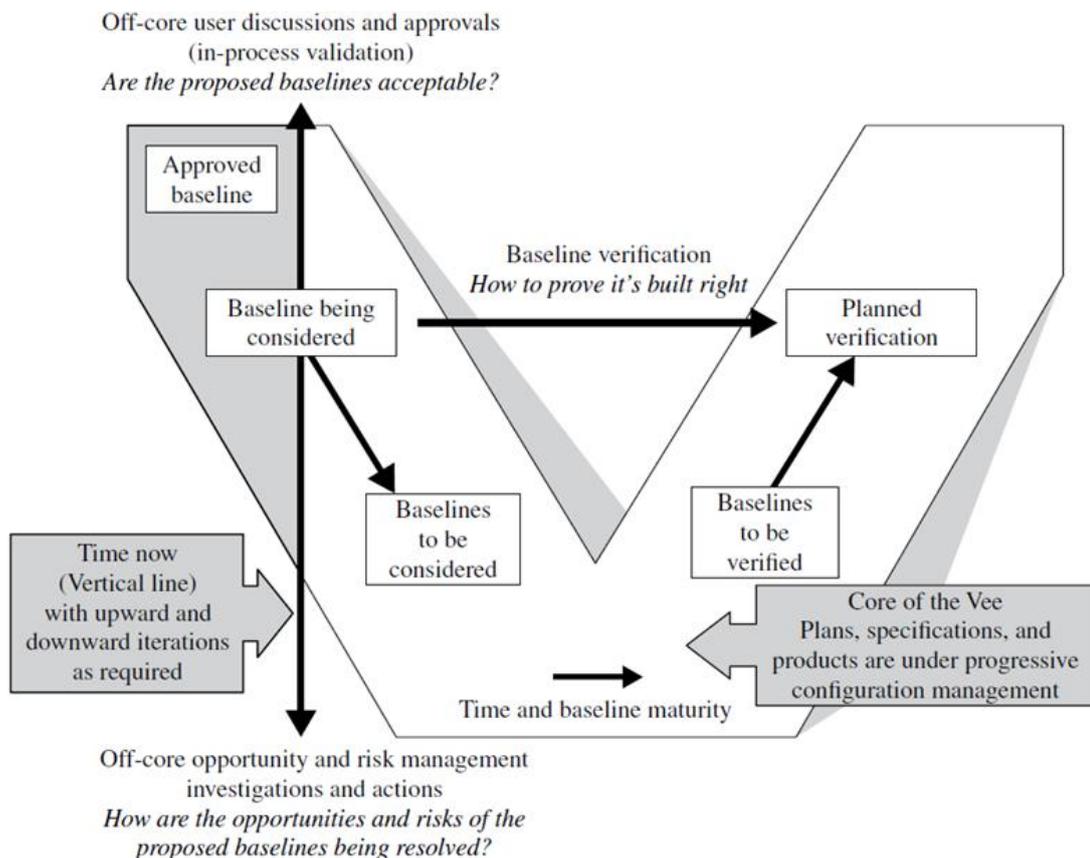


Figure 20 : partie gauche du cycle en V (International Council on Systems Engineering, 2015)

Description de la partie droite

La partie droite représente **l'intégration, l'assemblage et la vérification des éléments du système** vis-à-vis :

- Des exigences.
- Des choix de conception effectués dans la partie gauche du V.

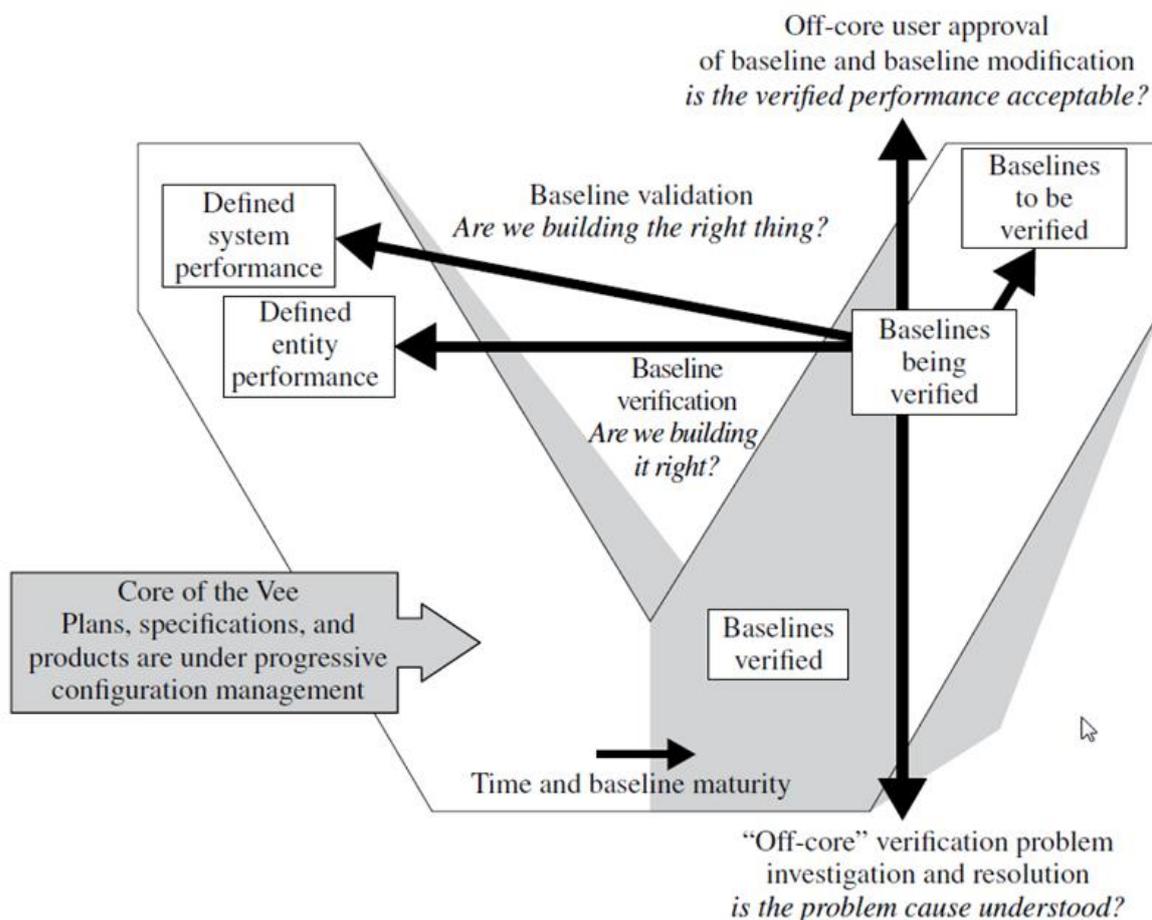


Figure 21 : côté droit du modèle du cycle en V (International Council on Systems Engineering, 2015)

Application du cycle en V...

... au secteur de la construction

Dans le secteur de la construction, une particularité importante est que la partie droite du cycle en V est immédiatement l'étape de mise en service. En effet, dans le domaine de la construction, il est impossible de construire un prototype du produit, car le produit final est directement réalisé.

Le développement d'une maquette numérique pourrait remplir ce rôle de prototypage dans le futur. Par conséquent, les non-conformités aux exigences identifiées lors des étapes de vérification de la partie droite :

- Peuvent difficilement être résolues.
- Ont des conséquences très importantes sur les coûts et les retards.

Ce phénomène est l'une des raisons du nombre important de non-conformités dans le domaine de la construction.

C'est pourquoi, plus que dans d'autres industries, des efforts supplémentaires sont nécessaires. En effet, il faut évaluer les risques impliquant des non-conformités aux exigences avant la phase de production.

... au « système pour faire »...

Le métamodèle du cycle en V est généralement utilisé pour modéliser le « système à faire ». Cependant, il peut également être utilisé pour modéliser le « système pour faire ».

▼ Niveaux de projet et équivalence en niveaux systémiques

Les différents niveaux systémiques peuvent représenter les différents niveaux de projet lorsque l'architecture du Système à faire et du Système pour faire sont alignés :

| Niveau de projet | Équivalence en niveau systémique |
|------------------|--|
| Projet. | Système. |
| Sous-projets. | Sous-systèmes. |
| Tâches. | Sous-sous-systèmes nécessaires pour développer le « système à faire » (figure 18). |

▼ Branche droite

Contrairement au modèle en V du « système à faire », la branche droite du V du « système pour faire » représente :

- Le projet.
- Les sous-projets.
- Les tâches requises pour valider, réaliser et assembler le « système à faire ».

▼ Liens entre la branche gauche et la branche droite

Les liens entre la branche gauche et la branche droite du modèle en V pour le « système pour faire » concernent l'anticipation des objectifs, des activités et des ressources requises dans la partie droite du V, à savoir les activités :

- De validation.
- D'assemblage.
- De réalisation.

Système pour faire

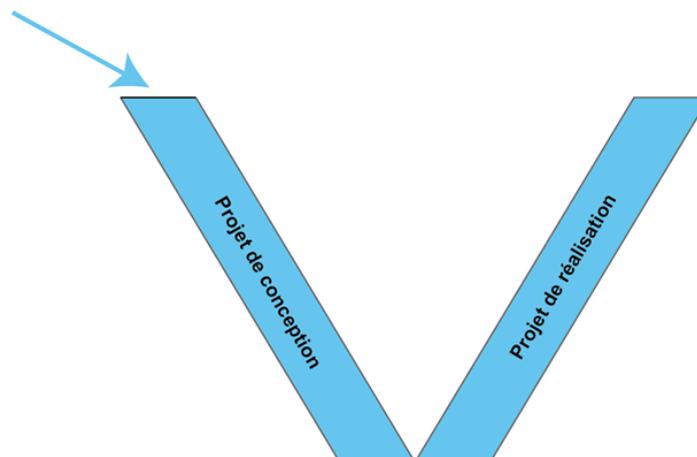


Figure 22 : métamodèle du cycle en V appliqué au « système pour faire »

Cette figure montre que simultanément au développement du produit et de ses différents niveaux systémiques, des éléments du « système pour faire » peuvent également être modélisés avec un métamodèle de type « cycle en V ».

... conjointement
au « système à faire »

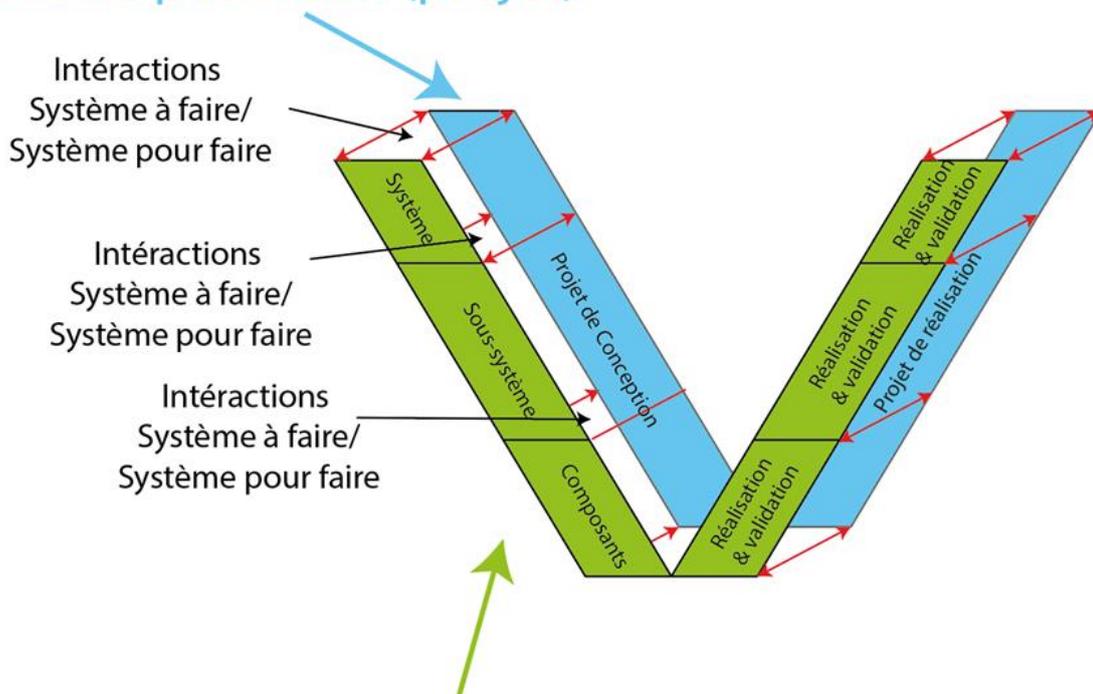
Il est possible de définir un métamodèle sous la forme d'un double cycle en V permettant de représenter à la fois :

- Le « système à faire ».
- Le « système pour faire ».
- Les interactions entre les deux.

Le cycle en V en vert représente le « système à faire » et le cycle en V en bleu le « système pour faire » permettant son développement (figure 22). L'analyse de constructibilité consiste alors à analyser les interactions entre les deux systèmes afin :

- De mieux évaluer et anticiper les risques.
- De mieux gérer la complexité et prendre les meilleures décisions relatives au développement du « système à faire ».

Système pour faire (projet)



Système à faire (produit)

Figure 23 : double cycle en V

Cette figure met en évidence le fait que la constructibilité consiste à analyser les interactions entre le système à faire (en vert) et le système pour faire (en bleu) à toutes les étapes de développement aux différents niveaux systémiques.

Constructibilité horizontale et verticale

De manière générale, nous pouvons considérer que deux types de processus peuvent être identifiés dans le « système pour faire » :

| | |
|-----------------------|---|
| Branche gauche | <p>Dans la branche gauche du modèle en V, les activités concernent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La planification. • La conception. • La modélisation. • La simulation. • La vérification. <p>Ce sont principalement des informations qui sont traitées au cours de ces activités, ainsi que leur acquisition et leur traitement.</p> |
| Branche droite | <p>Dans la branche droite de V, les activités concernent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La réalisation. • L'assemblage. • Les tests. • La logistique. <p>L'énergie et les matériaux sont les ressources essentielles de ces activités. Dans ces activités, les interactions spatiales sont fortes entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les éléments du système pour faire. • Son environnement. • Les éléments du « système à faire ». |

Par conséquent, il est important d'évaluer la constructibilité :

- **Non seulement des processus requis pendant le processus de réalisation dans la branche droite.**
- **Mais également des processus situés dans la branche gauche.**

Analyse de constructibilité verticale

Une analyse de la branche gauche du cycle en V...

... qui conduit à la définition d'exigences de constructibilité

Des activités de la branche gauche...

L'analyse de la constructibilité verticale consiste à :

- Évaluer la capacité du « système pour faire » à atteindre les objectifs.
- Réaliser les activités nécessaires à la planification et à la conception du futur système. Ces activités :
 - Ont des objectifs/contraintes.
 - Nécessitent des ressources.
 - Sont composées de processus et de méthodes.

L'analyse de la constructibilité verticale conduit à la définition d'exigences de constructibilité qui doivent être :

- Tracées.
- Vérifiées.

La plupart des activités de la branche gauche du V concernent :

- La collecte de données.
- La création d'informations.
- La création du référentiel des exigences.
- La garantie de la qualité des informations.
- La modélisation.
- La simulation.
- La vérification des exigences.

Ces activités nécessitent :

- Des outils.
- Une puissance de calcul.
- Des capteurs pour la collecte de données.
- Des moteurs pour effectuer des forages.
- Des ressources humaines pour gérer et exécuter les tâches.
- Etc.

... qui font partie
du « système pour faire »

Tous ces éléments font partie du « système pour faire ».

L'analyse de la constructibilité verticale consiste à analyser la capacité du « système pour faire » à développer le « système à faire ».

Exemple

Les processus BIM (cas d'usage BIM, plan d'exécution BIM, etc.) font partie du « système pour faire ».

L'évaluation des contraintes liées à ces processus et la définition des exigences associées aux processus BIM font partie de l'analyse dite de « constructibilité verticale ».

Système pour faire (projet)

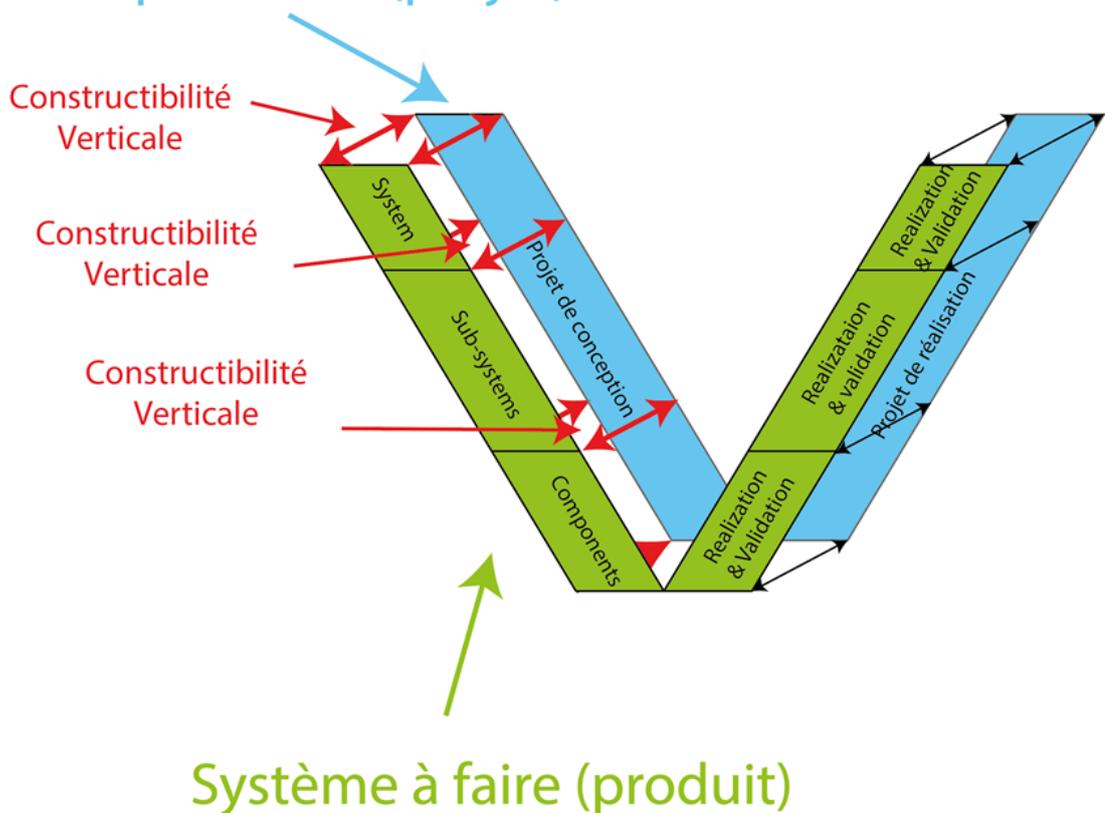


Figure 24 : analyse de constructibilité verticale dans le double cycle en V

Une analyse
des interactions

Développement
d'un avatar du produit

La constructibilité verticale (en rouge) consiste à analyser les interactions entre les activités de la branche gauche du cycle en V et le « système à faire ».

En constructibilité verticale, les activités consistent à développer un avatar du produit (également appelé modèle). Cet avatar représente le plus possible le produit développé dans la branche de droite.

Constructibilité horizontale

Une analyse des activités de la branche droite...

... à différents niveaux systémiques...

Contrairement à l'analyse de constructibilité verticale, l'analyse de constructibilité horizontale consiste à analyser la branche droite du cycle en V.

Dans la branche droite :

- Les éléments du système sont réalisés.
- Les matériaux et les composants sont transférés, stockés, assemblés et vérifiés.

Les activités de la branche droite ont des objectifs et nécessitent des ressources à différents « niveaux systémiques ». Les exigences liées à ces contraintes doivent être définies et suivies de manière similaire à d'autres types d'exigences de constructibilité.

L'analyse de constructibilité à un niveau systémique élevé lors de la définition des besoins répond aux questions suivantes :

- Comment cette vérification est effectuée ?
- Que faut-il mesurer et comment ?
- Qui est en charge de le faire ?

Une analyse de constructibilité horizontale ne concerne pas seulement les faibles niveaux d'abstraction et les composants concrets.

Exemple

Les conditions des activités de vérification peuvent faire partie d'une analyse de constructibilité.

Enabling System (project)

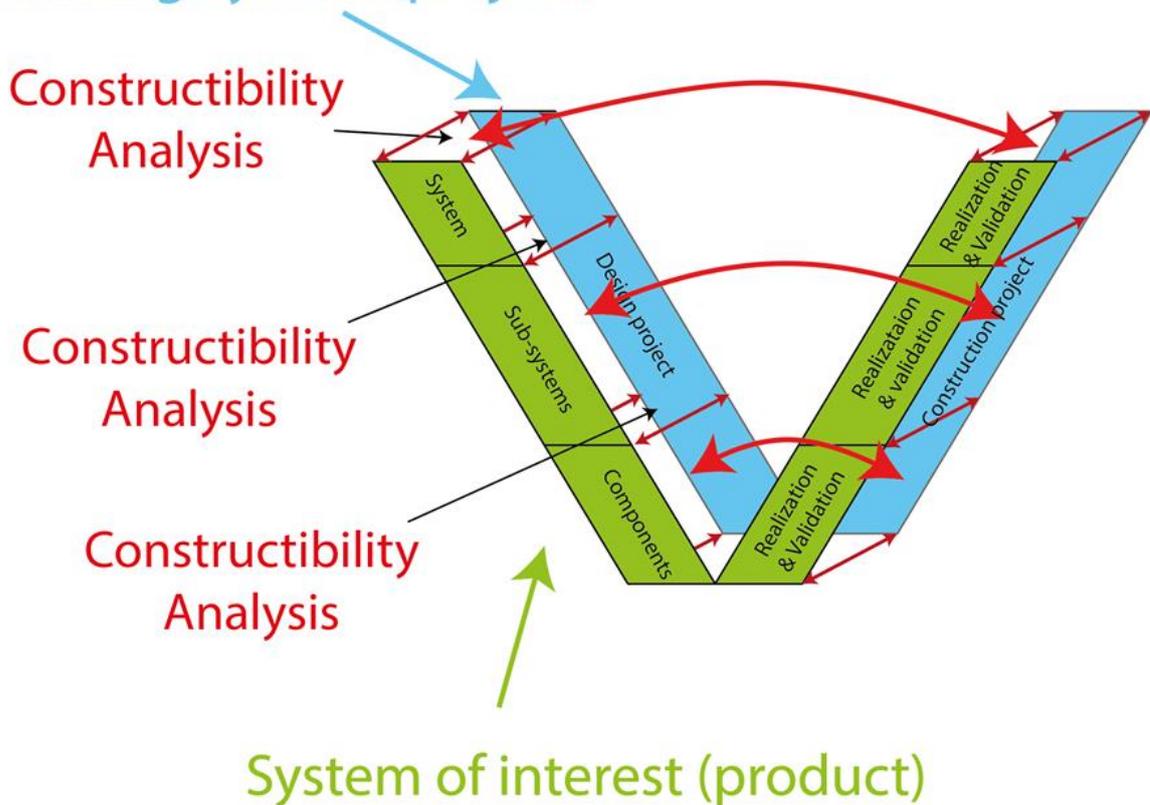


Figure 25 : analyse de constructibilité horizontale et cycle en double V

... et une prise en compte des exigences liées au « système pour faire »

La figure 25 montre que la constructibilité horizontale consiste à prendre en compte les exigences liées aux éléments du « système pour faire » situés dans la branche droite du V lors de la modélisation du « système à faire » dans la branche gauche du cycle en V.

Particularité des activités d'assemblage et de logistique

De plus, la définition et la distinction entre la constructibilité verticale et horizontale contribuent à structurer le référentiel des exigences liées aux « systèmes pour faire ».

Les activités d'assemblage et de logistique ont la particularité d'impliquer des ressources matérielles dans leurs processus et donc dans l'espace.

L'espace utilisé pour les activités de logistique et d'assemblage est souvent concourant avec des espaces alloués à des vues organiques ou fonctionnelles.

Lorsque le système est dimensionné, il est donc important prendre en compte les exigences spatiales liées au « système à faire » et au « système pour faire ».

Exemple

L'emplacement des engins de chantier, le déplacement des éléments lourds (cheminement des transformateurs par exemple) doivent être pris en compte lors du dimensionnement et pas seulement pour le fonctionnement nominal du système à faire.

Cycle en W

Une adaptabilité de la loi MOP...

Le fonctionnement typique issu de la loi MOP s'adapte parfaitement à cette approche.

En effet la loi MOP n'est pas un obstacle. Elle est au contraire un cas d'application pertinent puisqu'il distingue bien les deux parties du cycle :

Avec la branche descendante...

... qui va en approfondissant les exigences, avec une vérification sur des jalons identifiés.

Avec la branche montante, durant la réalisation...

... de la passation de marché jusqu'aux OPR (opérations préalables à la réception), en passant par les réunions de suivi de chantier, qui va revérifier la conformité aux exigences en partant de l'organique (product breakdown) pour finir avec les exigences de type fonctionnel au moment :

- De la mise en service (commissioning).
- Des marches à blanc.

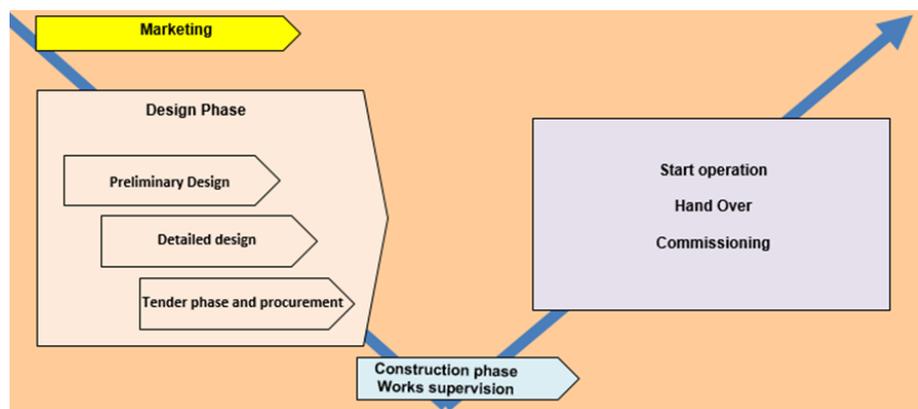


Figure 26 : représentation de la loi MOP

... permettant d'utiliser l'approche en W...

Avec le BIM, il est possible :

- D'aller plus loin que le cycle en V, jugé peu agile.
- De réutiliser l'approche en W, développée par l'industrie du numérique.

Introduction du processus BIM

Le processus BIM est introduit :

- En phase amont.
- En appliquant soigneusement le concept de LOIN « Level Of Information Need » de la norme ISO 19650.

Cela permet de mettre un jumeau numérique du niveau des exigences requises à disposition du manager de projet. Dès lors, chaque revue de projet ou chaque jalon du contrat est l'occasion d'anticiper les OPR finales, en procédant à une réception de l'ouvrage virtuel conforme au niveau d'information et d'exigence requis.

Le jumeau numérique permet :

- De simuler un prototype dès le départ et tout le long du cycle de vie.
- D'approfondir et d'améliorer le système qualité.

Représentation de chaque étape par un « V » miniature

Dans le cycle en W, chaque étape du cycle en V classique est également représentée par un « V miniature ». Ainsi, le cycle en V prend la forme d'une « forêt de V ». Ce métamodèle signifie que :

- Le système est vérifié et validé grâce à l'utilisation d'un jumeau numérique à chaque étape du cycle en V.
- Le système n'est plus vérifié au moment de sa réalisation, mais au moment de sa conception (dans la partie gauche du V).

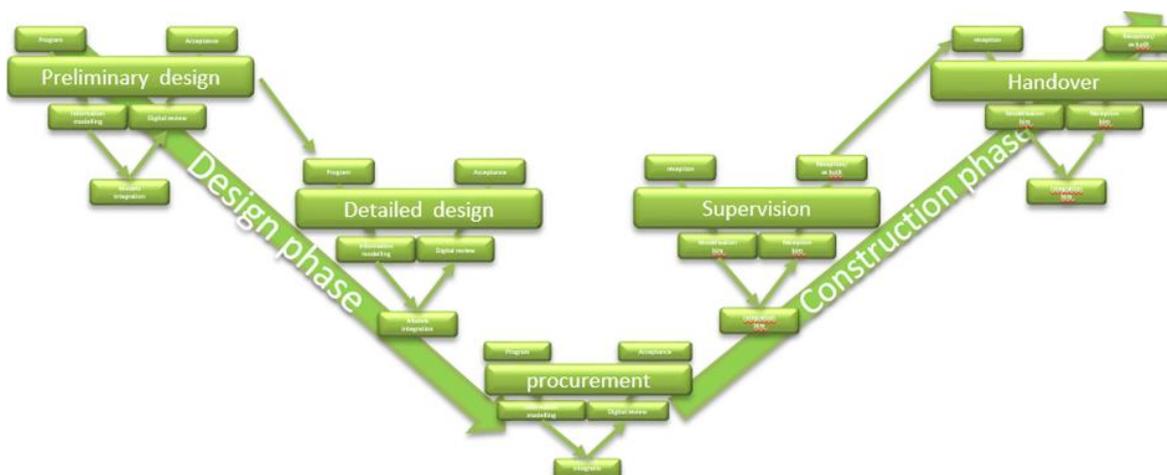


Figure 27 : cycle en W dans le secteur de la construction (adapté du cycle en V)

Utilisation potentielle du jumeau numérique en tant que prototype

Avec le développement du BIM dans le domaine de la construction, l'application du méta modèle en V classique pose question. Si les activités de modélisation et de simulation sont testées et approuvées sur plusieurs projets, pourraient-elles prendre le pas sur les nécessités de vérification et validation une fois le système construit ?

Dans ce cas, le jumeau numérique prendrait en effet le rôle d'un prototype de l'ouvrage à réaliser. Cela permettrait :

- D'économiser les étapes de vérification/validation dans la branche droite du V.
- De faire des économies en coût et en délais.

Même si cette possibilité paraît intéressante, elle reste à **prendre avec une grande vigilance**. En effet, le caractère unique de chaque projet permet-il de nous assurer

une sécurité suffisante dans la construction des ouvrages validés grâce au jumeau numérique ? Et avec quel niveau d'incertitude ?

Limites du cycle en V

Des études de chaque domaine métier qui ne progressent pas simultanément

Des activités de la partie gauche du V concourantes

Des infrastructures ne pouvant pas être considérées comme des prototypes...

... contrairement à la MN3D!

Vérification de la satisfaction des exigences

Le cycle en V représente une vision simplifiée et idéale des processus de définition, conception, réalisation et vérification des exigences.

Les études de chaque domaine métier ne progressent pas simultanément.

Il y a donc un niveau hétérogène d'incertitude et de validation des hypothèses selon les objets.

On peut illustrer cela en représentant un cycle en V par système ou par domaine métier. Ainsi, le jumeau numérique ne peut être validé aveuglément en considérant un même niveau de validation dans les hypothèses (dimensionnement, choix techniques, etc.).

Beaucoup des activités de la partie gauche du V se font de façon concourante. Très souvent, les travaux sont engagés sans que la validation des études ne soit terminée.

Le processus de construction représente la partie droite du cycle. La partie basse et la partie de droite du V démarrent donc avant d'avoir terminé la partie gauche.

Il est souvent dit dans le BTP que nous réalisons des prototypes, notamment pour les infrastructures.

Selon Badreau et Boulanger (2014), un prototype est un objet destiné à vérifier la faisabilité d'une solution sous un aspect particulier. Ainsi, une infrastructure construite ne peut être considérée comme un prototype. Elle est réalisée comme ouvrage unique.

La MN3D peut être considérée comme un prototype selon un ou plusieurs usages. **On crée donc plusieurs prototypes pour plusieurs usages.**

C'est l'ensemble de ces prototypes (partie droite du V vérification dans la MN des exigences définies dans la partie gauche du V) qui permet d'aller vers la réalisation d'un ouvrage unique qui répond aux exigences.

Le BIM et la modélisation numérique des informations doivent permettre cette relation entre :

- La MN.
- Ses usages.
- L'ouvrage final construit et livré.

Pendant les travaux, on vérifie la satisfaction des exigences (réunions de chantier, revues de projet, etc.) :

- Durant la remontée de la partie droite.
- En partant des objets simples jusqu'au moment des OPR quand est commissionné puis testé le fonctionnement global (des systèmes) de l'ouvrage.

La vérification de la partie basse et à droite du cycle en V est donc réalisée à l'avancement pour les ouvrages.

Cependant, la réception permet la vérification à l'échelle de l'infrastructure.

7. MODÉLISATION EN INGÉNIERIE SYSTÈME

Présentation du langage SysML...

Un langage développé par l'OMG...
... adapté de l'UML 2...

SysML (System Modelling Language) est **le langage standardisé le plus utilisé pour décrire et modéliser les systèmes artificiels complexes**.

Il a été développé par l'OMG (Object Management Group) **pour offrir un langage standardisé et uniforme pour l'ingénierie système** (Weilkiens, 2006).

SysML est une adaptation de l'UML 2 (Unified Modeling Language) pour les systèmes industriels (figure 28).

Alors que l'UML a été développé pour les systèmes logiciels, SysML est l'adaptation de ce langage pour les systèmes industriels notamment en ajoutant la possibilité de modéliser les éléments suivants (Roques, 2009), (Weilkiens, 2006) :

- Description des exigences et de leur traçabilité.
- Représentation des éléments non logiciels (mécanique, hydraulique, capteurs, etc.).
- Représentation des équations physiques.
- Représentation des flux (matériaux, énergie, information).
- Représentation des liens logiques/physiques, structurels/dynamiques.

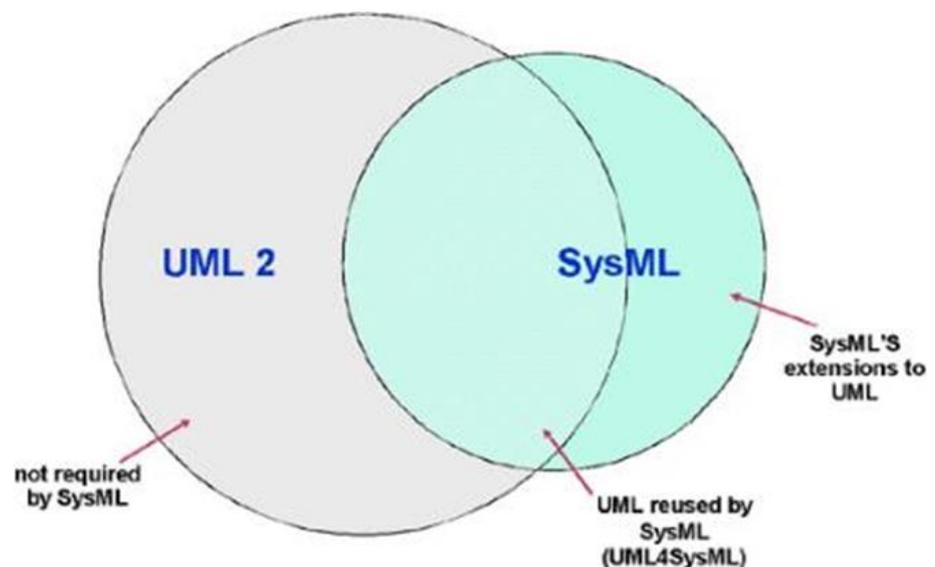


Figure 28 : SysML, une adaptation d'UML 2 (OMGSysML, 2018)

... et qui n'inclut pas pour l'instant la représentation spatiale

Nous pouvons déjà noter que la représentation spatiale et notamment de « l'espace physique » n'est pas incluse dans SysML actuellement.

Des travaux ultérieurs pourraient amener à adapter ce langage en incluant une ou plusieurs représentations spatiales du système.

... et de ses diagrammes Les diagrammes SysML peuvent être répertoriés comme suit :

| | |
|-----------------------------------|--|
| Diagrammes de comportement | Les diagrammes d'activité permettent de modéliser les séquences d'activité du système. |
| | Les diagrammes de séquence représentent les flux d'information entre les sous-systèmes du système par des scénarios. |
| | Les diagrammes de cas d'utilisation représentent les liens fonctionnels entre les acteurs et le système. |
| | Les diagrammes d'état permettent de représenter les états successifs du système. |
| Diagrammes d'exigence | <p>Les diagrammes d'exigence permettent de représenter :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les exigences auxquelles le système doit répondre. • Les relations entre celles-ci. |
| Diagrammes de structure | Les diagrammes de bloc représentent la composition du système. |
| | Les diagrammes de bloc internes représentent : <ul style="list-style-type: none"> • Les éléments internes du système. • Les liens entre ceux-ci. |
| | Les diagrammes paramétriques permettent de représenter : <ul style="list-style-type: none"> • Les équations qui régissent le fonctionnement. • La structure du système. |
| | Les diagrammes de package représentent : <ul style="list-style-type: none"> • L'organisation logique du système. • Les relations entre ces packages. |

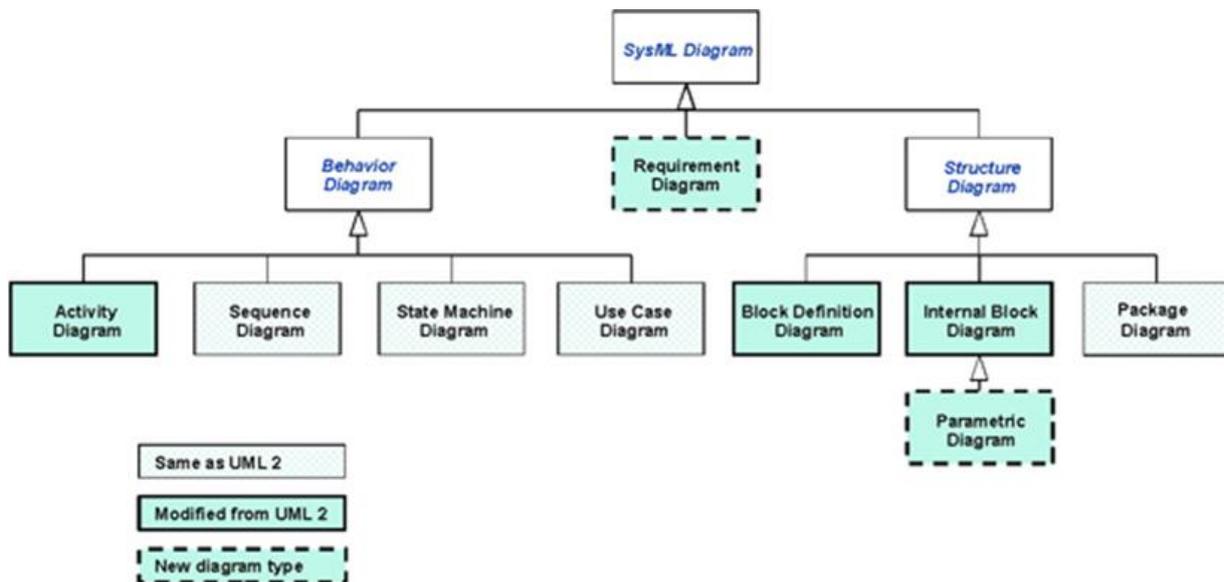


Figure 29 : diagrammes SysML divisés en diagrammes de comportement, de structure et d'exigence (OMG SysML, 2018)

8. STRUCTURATION DE L'INFORMATION

8.1. Qu'est-ce que la structuration de l'information ?

Une structuration des informations...

L'objectif de ce livrable est d'offrir des clés pour la structuration des informations des maquettes numériques. Cette dernière permet :

- De faire des requêtes.
- De mettre à jour une base de données de manière rapide et efficace (Wirth, 1985).

... de manière analogue aux exigences...

Si l'objectif de la maquette numérique est de concevoir un produit conforme à l'ensemble des exigences du projet, il semble cohérent de structurer les informations de manière analogue aux exigences.

En effet, les activités de conception consistent essentiellement à vérifier que les exigences suivantes soient remplies :

- Exigences du client.
- Exigences techniques.

Ainsi, les requêtes et les modifications de la base de données sont étroitement liées aux exigences.

... qui intègre le « découpage spatial »...

Comme nous l'avons présenté ci-dessus, l'ingénierie système et plus précisément l'architecture système permet de structurer les exigences.

Nous y avons apporté une dimension supplémentaire en intégrant le « découpage spatial » dans la structuration des exigences.

Une extension du BIM au domaine des infrastructures...

Le développement du BIM et son extension au domaine des infrastructures est l'occasion pour le monde de la construction de repenser ses processus.

... permettant une réflexion approfondie sur les besoins et exigences

Introduire la gestion des exigences replace l'acte de construire. En effet, il ne s'agit pas « simplement » et seulement de construire : **il faut penser le besoin auquel répond l'acte.**

Cette réflexion à l'ère de la trajectoire « bas carbone » est d'autant plus justifiée et rend le besoin de structuration de l'information d'autant plus pertinente. Comment vérifier que les exigences sont effectivement tenues durant tout le cycle de l'ouvrage et de l'information ?

L'intégration de la maquette numérique à partir du cycle en W à tous les stades des processus doit aider à cette démarche permanente. Cette démarche trouve un prolongement dans la phase d'exploitation selon la structuration de l'information.

8.2. Mise en œuvre de la structuration

Représentation du métamodèle des IFC

La représentation du métamodèle des IFC (figure 30) permet d'apporter une réponse sur les outils utilisés dans l'extension du BIM aux infrastructures.

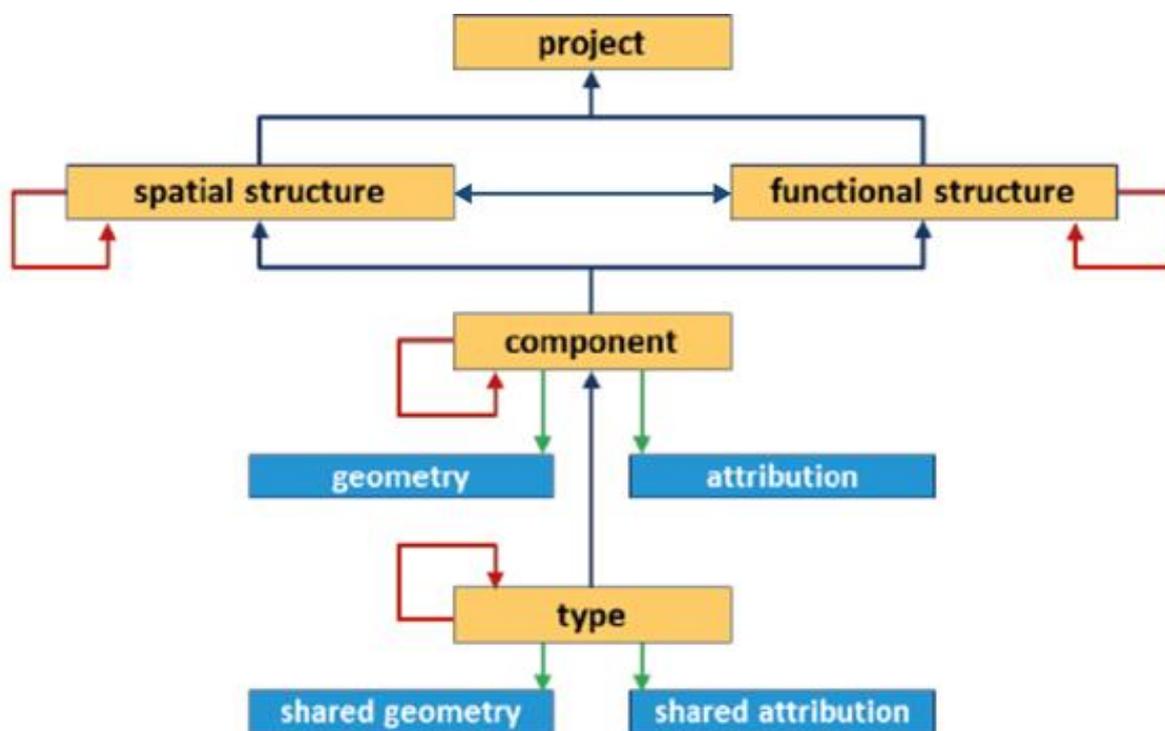


Figure 30 : métamodèle IFC 4

Une triple décomposition

Le métamodèle s'appuie sur trois décompositions :

- Une décomposition spatiale.
- Une décomposition fonctionnelle.
- Une décomposition par objet³.

Cette triple décomposition est décrite selon une approche UML. Elle permet d'illustrer comment dans le modèle IFC, des instances peuvent attacher des propriétés qui sont autant de correspondances possibles entre :

- Performances attendues (spécifiées ou réalisées).
- Exigences de niveaux correspondants.

Un développement dans le modèle « IFC bridge »...

Le schéma de la figure 31 montre le développement du métamodèle dans le modèle « IFC bridge ». Cet exemple montre l'utilisation d'un « container » de type spatial pour introduire une décomposition spatiale au sein d'un ouvrage de type « bridge » dans le modèle plus vaste que sont les IFC.

³ On prendra le terme objet de façon générique regroupant les termes « product », « object » ou « component ».

Règles UML 2

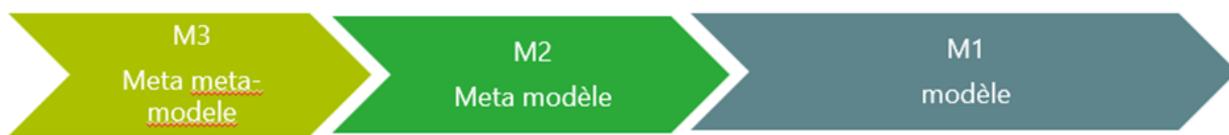
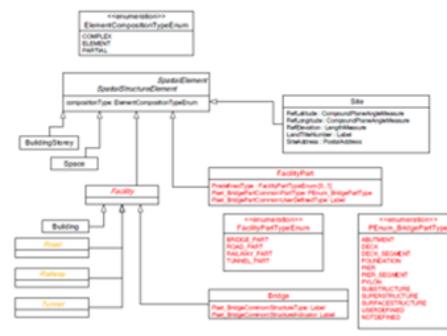
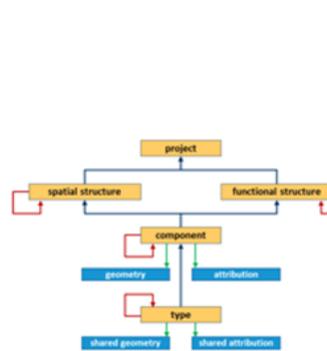


Figure 31 : développement du métamodèle dans le modèle « IFC bridge »

... qui rend possible une décomposition spatiale dans un modèle UML

Il apparaît ainsi possible d'entrer une décomposition spatiale dans un modèle de type UML. Il apparaît également que :

- La décomposition spatiale décrit autre chose que la géométrie traditionnelle des modèles 3D.
- La partie attributaire s'appuie sur d'autres propriétés que celles décrivant la géométrie.

Il reste à démontrer que :

- Cette décomposition spatiale dans les IFC, issue de la décomposition spatiale d'un immeuble, ne vient pas masquer une décomposition fonctionnelle.
- Les différentes décompositions spatiales possibles peuvent y être décrites.

Liaison avec le métamodèle IFC 4
 Une convergence possible avec l'approche issue de l'IS...
 ... en considérant les outils à développer autour de l'IFC

Au-delà d'une différenciation qui pourrait sembler essentiellement sémantique, il faut considérer la convergence possible :

- De l'approche issue de l'ingénierie système.
- Du développement des IFC.

Il faut considérer les outils à développer autour des IFC. Cela permet à l'utilisateur final de pratiquement mettre en œuvre une telle approche lors de l'utilisation des modèles réels. Lors de l'implémentation dans les outils métiers par les éditeurs de logiciels, il faut ainsi prévoir la possibilité d'extraire des parties de modèles :

- Qui ne reproduisent pas seulement la décomposition par objet.
- En ignorant les autres décompositions.

Il s'agit des **Model View Definition (MVD)**. Ces modèles :

- Sont les spécifications techniques en direction des outils de création des modèles.
- Permettent d'extraire des modèles IFC la partie du modèle concerné par un cas d'usage métier donné (liste des objectifs métiers et usages BIM pour le projet en annexe).

Une reprise des niveaux d'exigences de l'IS

La figure 32 reprend les trois niveaux d'exigences de l'ingénierie système décrite par la figure 14. Il semble donc possible de :

- Partir de cette décomposition d'exigences.
- Faire le lien avec le métamodèle des IFC.

Il reste, à partir de là, à résoudre une question : la décomposition spatiale doit-elle elle-même reprendre la décomposition de l'ingénierie système ? Ou considère-t-on simplement que la décomposition spatiale est une décomposition du même niveau que la décomposition fonctionnelle ?

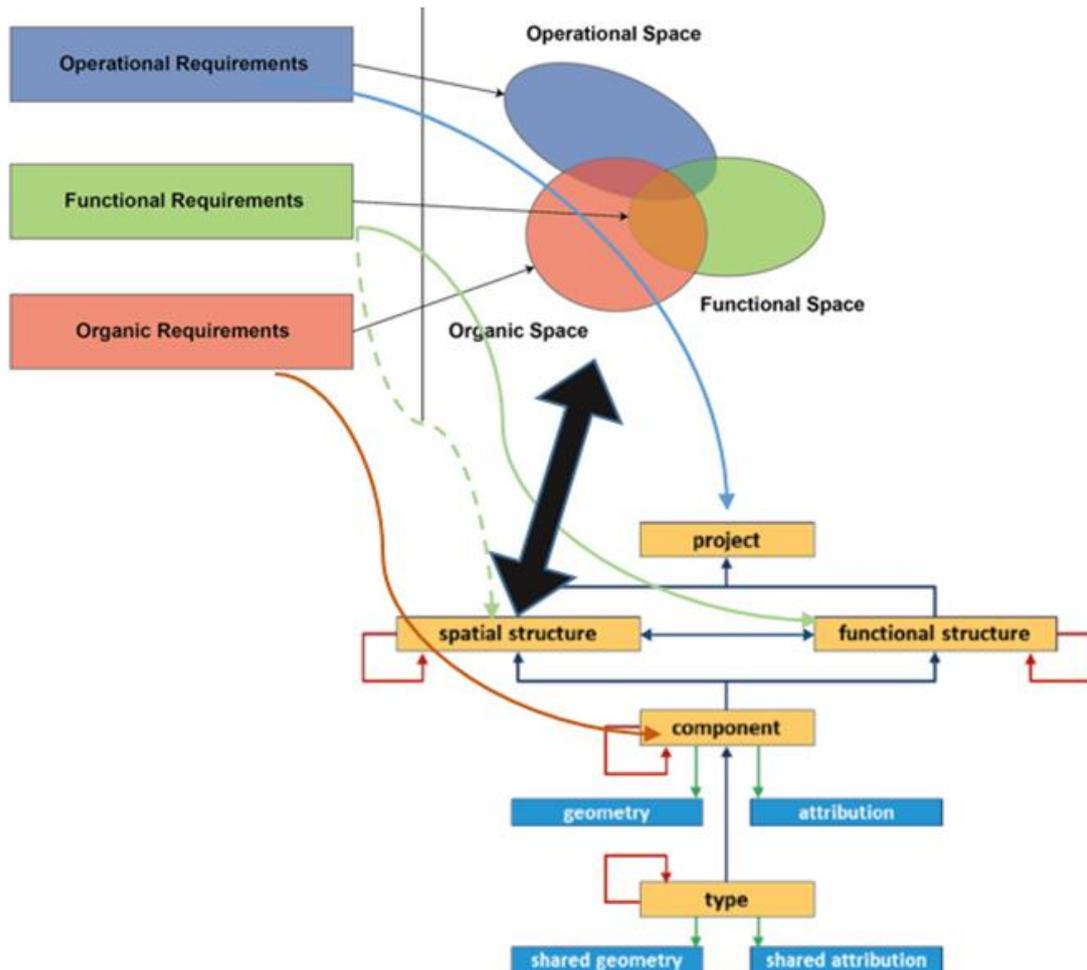


Figure 32 : liaison avec le métamodèle IFC 4

Différence entre la maquette numérique et le jumeau numérique

Il faut considérer la maquette numérique comme la base du jumeau numérique dès le démarrage des études.

Le jumeau numérique indique que l'on représente un objet dans une définition dynamique. C'est la différence entre la maquette numérique et le jumeau numérique :

La maquette numérique...

... donne à voir en virtuel, l'objet réel tel que conçu ou tel que construit.

Le jumeau numérique...

... cherche à introduire dans l'objet virtuel son « historicisation » ou la possibilité de la simulation.

Liaison avec l'approche en W

Un double jeu doit pouvoir se mettre en place dans les processus de conception et de réalisation qui puisse ordonnancer (au sens « management de projet ») la maquette numérique pour répondre au besoin de chaque phase.

La figure 33 montre le lien que l'on pourrait retrouver entre :

- Une structuration de l'information basée sur les IFC.
- Les trois visions de l'ingénierie système s'appliquant au cycle de vie de la conception et de la réalisation.

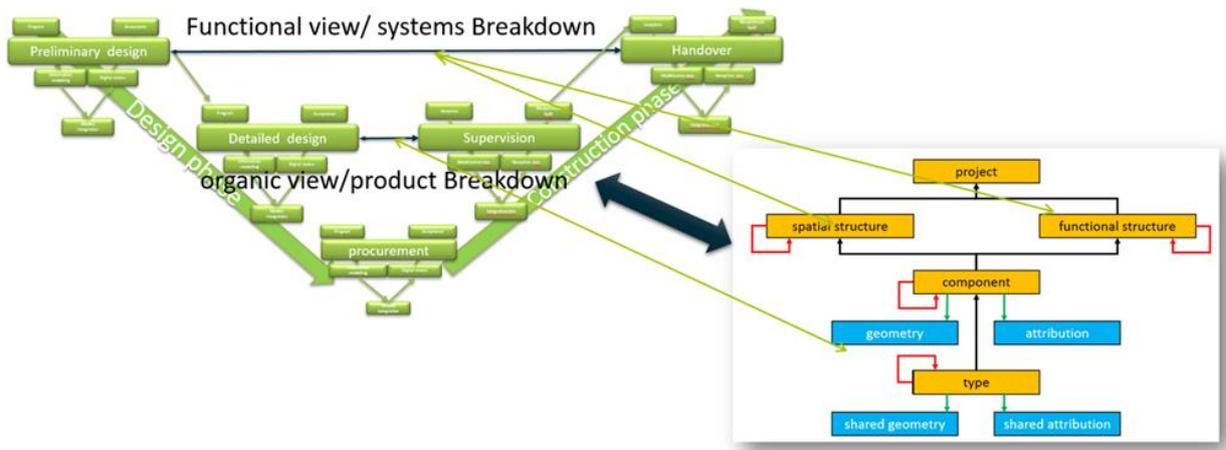


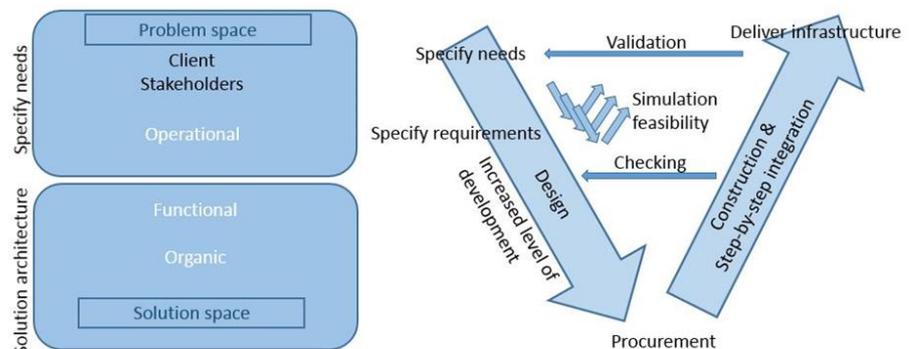
Figure 33 : liaison avec l'approche en W

Liaison avec les exigences spatiales

La figure 34 propose le cas d'application lié aux exigences liées à la décomposition spatiale à laquelle seraient appliqués les trois niveaux de l'ingénierie système.

Il fonctionne à l'identique que le cas de la figure 32. Par exemple, pour « RailTopo-Modèle » dont l'objet est la simulation à partir d'un modèle topologique d'un réseau ferré.

La dimension organique n'a pas alors pour but de modéliser le tel « qu'à construire », mais le tel « qu'il doit fonctionner ».



- Validation: Validation of the whole infrastructure through operational tests → Satisfy needs
- Checking: Verify infrastructure components through functional and organic tests → Satisfy requirements

Figure 34 : exigences spatiales

**Interopérabilité
entre les normes
ou les modèles**

Dans la phase actuelle de structuration de l'information, les questions à résoudre portent notamment sur l'interopérabilité entre les différentes normes ou les différents modèles.

La structuration de l'information à partir des visions de l'ingénierie système oblige à prioriser la gestion des exigences, et la continuité numérique. Cela permet une vérification sous de multiples points de vue.

**Application aux
IFC-Bridge (UC3)
et à la précontrainte**

Un système de précontrainte est un système :

- Complexe.
- Transverse à de nombreux autres systèmes dont la structure portante est horizontale (le tablier de l'ouvrage, portant la superstructure, c'est-à-dire la voie routière ou ferroviaire).

Le système de précontrainte a un impact fort sur la rigidité et la géométrie de l'ouvrage. Il est composé de multiples sous-systèmes qui passent au travers d'une collection d'éléments pour les assembler ensemble et les maintenir (pendant les phases temporaires de construction et en phase définitive d'exploitation).

L'application des principes de l'ingénierie système à la précontrainte permet de faire les validations itératives nécessaires à construction de l'ouvrage complet.

9. EXEMPLE SUR UN CAS D'USAGE : LA 5^E LIGNE DE LYON

Vue d'ensemble

Prenons l'exemple déjà utilisé précédemment en illustration sur la conception de la 5e ligne de métro de Lyon pour l'illustrer l'impact de l'intégration de l'espace :

- Dans les méthodes d'ingénierie système.
- Sur les outils et standards à utiliser.

Première étape : établissement du besoin

Définition des aspects à étudier...

La première étape de la conception consiste à établir le besoin auquel la future ligne de métro va répondre. Pour cela, **il est nécessaire d'analyser l'environnement : la ville.**

La ville peut être considérée comme un « système de systèmes ». Il est nécessaire de définir quels sont les aspects à étudier qui peuvent nous aider à qualifier ce besoin.

Exemples d'aspects à étudier

Quels sont les besoins en déplacement dans l'agglomération lyonnaise vers et depuis le 5^e arrondissement ?

Quel est le système de transport actuel (routes, bus, voies cyclables, etc.) et quelle est sa fréquentation ?

... à l'aide de technologies SIG

Ce sont autant d'informations que l'utilisation de technologies SIG peut aider dans ce cas afin d'allouer les besoins et les systèmes de transport existants dans l'espace.

Deuxième étape : définition d'exigences opérationnelles...

Cette analyse va alors amener à la définition d'exigences dites « opérationnelles » qualifiant le besoin. Ces exigences vont devoir être allouées au futur système à déployer pour y répondre.

... et évaluation des moyens/contraintes et vérification du système

Simultanément, il est nécessaire :

- D'évaluer les moyens et les contraintes impactant l'analyse des besoins auxquels répond la future ligne de métro.
- De vérifier le système en phase de conception et de le valider en phase de « mise en service ».

On fait référence ici aux **deux schémas de double cycle en V et de cycle en W** présentés plus haut :

- L'un consiste à dire qu'il faut évaluer les contraintes pour analyser le besoin (enquêtes ménages ? Traces GSM ?) et les incertitudes qui y sont liées.
- L'autre indique qu'il doit être possible de modéliser le système afin de créer un « jumeau numérique » permettant de rapidement évaluer sa capacité à répondre au besoin ainsi que ses impacts sur son environnement.

Troisième étape : modélisation du futur système

Format

Prise en compte des exigences opérationnelles

Le futur système peut alors être modélisé. Dans notre cas, le métro est modélisé avec :

- Ses arrêts et tronçons.
- Sa capacité de transport par heure et par direction.

Ce modèle pourrait être sous format **IFC ou RailTopoModel**.

Les exigences opérationnelles peuvent alors y être allouées et vérifiées.

Nécessité...

... d'utiliser conjointement des outils et standards différents

... de poursuivre les recherches

Cet exemple simple et l'application des concepts utilisés montrent qu'il peut être nécessaire d'utiliser conjointement des outils et des standards différents pour une même analyse. Par exemple ici, les IFC et CityGML.

Cela pose plusieurs questions pour la suite :

- Faut-il pouvoir tout modéliser dans un même standard ?
- Ou faut-il définir les points de jointure nécessaires et suffisants pour que les échanges puissent se faire sans pertes d'informations ?

Cet exemple montre qu'il est nécessaire :

- De poursuivre les travaux commencés.
- De trouver d'autres cas d'usage et d'autres projets sur lesquels tester la méthode proposée d'intégration :
 - De l'espace dans l'ingénierie système.
 - Des interactions entre « système à faire » et « système pour faire ».
 - De l'utilisation conjointe des standards BIM et SIG.

10. DE LA STRUCTURATION DES EXIGENCES AUX USAGES BIM

Qu'est-ce qu'un usage BIM ?

Un processus numérique...

... nécessitant des prérequis

On appelle « Usage BIM » un processus numérique élémentaire (domaine des techniciens BIM) qui **répond à objectif métier** :

- Soit seul.
- Soit en combinaison.

Un usage BIM nécessite souvent des prérequis. Par exemple, l'usage BIM « 4D » nécessite :

1. Un découpage spatial et un découpage en système du projet.
2. Un découpage en plots de bétonnage.

Ces éléments :

- Doivent être cohérents avec la décomposition en tâches du planning.
- Nécessitent donc un travail préalable de découpage et de classification des « objets » du projet.

Quel est l'intérêt de la structuration des informations et exigences ?

La structuration des informations et des exigences décrit la manière dont va être constituée la maquette numérique pour répondre au besoin de définition d'un plan de mise en œuvre du BIM.

Dans la figure 37 ci-dessous, le terme « besoin » considère l'ensemble des besoins et exigences considérées pour la définition de l'usage BIM.

Un usage BIM adresse :

- À la fois le « système à faire » via les exigences à satisfaire.
- Ainsi que le « système pour faire » via les processus métier et l'organisation des ressources.

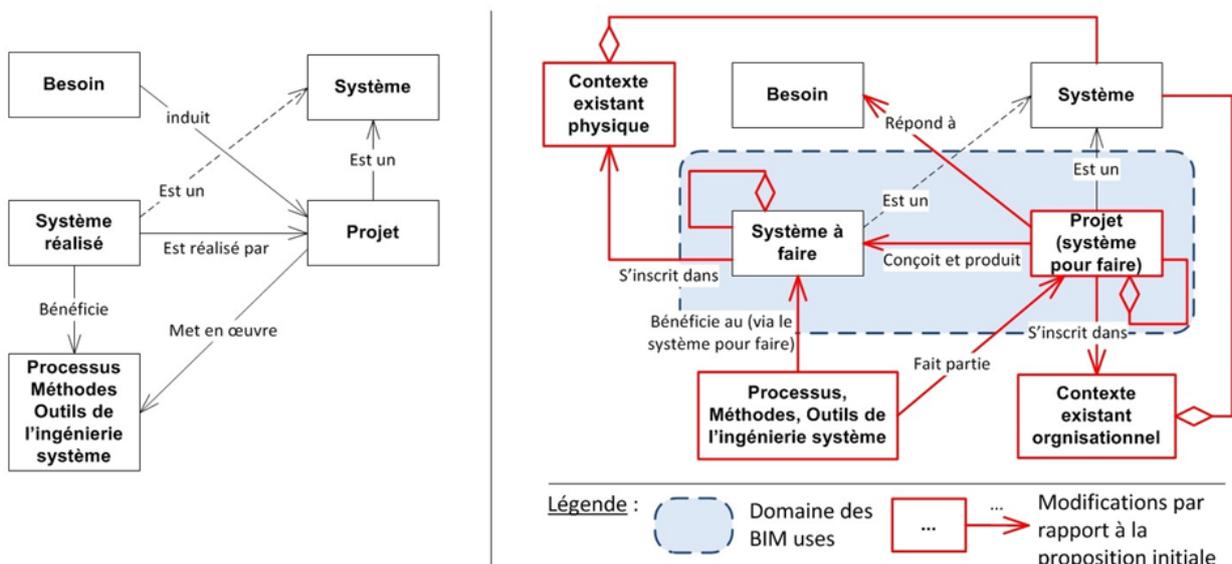


Figure 35 : application des concepts de « système à faire » et « système pour faire » (partie gauche) (Badreau, S. et Boulanger, J.-L., 2014) aux usages BIM (BIM uses dans cette figure) (Tolmer, 2016)

Définition des objectifs dans le plan de mise en œuvre du BIM

Élaboration du plan

Distinction entre les expressions « objectif métier » et « usage BIM »

Définition des objectifs métiers à atteindre avec une démarche BIM...

... et qui doivent être parfaitement atteignables

Le plan de mise en œuvre du BIM est la réponse détaillée des acteurs au cahier des charges BIM du projet.

Cette réponse est élaborée dès la remise de leur offre. Elle est éventuellement détaillée aux premiers jours de la mise en vigueur de leur contrat.

Ce plan doit décrire très précisément :

- La structuration des données.
- Les processus mis en place par chaque acteur pour partager et utiliser ces données dans le cadre du projet.

Dans le document, il faut distinguer l'expression « objectif métier » de l'expression « usage BIM ».

Définition d'un objectif métier

Un objectif métier est un cas d'usage métier représentant un processus élémentaire de conduite de projet (domaine de la gestion de projet). Exemples : « métrés » ou « synthèse ». Tous les objectifs métiers sont à réaliser sur un projet afin de mener celui-ci au bout. Certains objectifs peuvent être identifiés comme devant être traités avec une démarche BIM.

Les objectifs métiers à atteindre avec une démarche BIM (et non pas des usages BIM) sont définis par le donneur d'ordre et la direction de projet.

Pour réaliser leurs choix, ils doivent s'appuyer sur :

- Une proposition d'objectifs à atteindre.
- Une évaluation de l'effort à fournir pour chacun de ces objectifs.
- La maturité des technologies (disponibilité des fonctions dans les logiciels utilisés, performance des logiciels, capacité des stations de travail, hébergement sécurisé des serveurs, performance de l'architecture informatique).
- La maturité des parties prenantes (capacité des intervenants à fournir la donnée structurée pour contribuer à l'usage BIM considéré, maîtrise des technologies nécessaires, etc.).
- La maturité du processus (mise en œuvre éprouvée, évaluation de l'efficacité, niveau de confiance, etc.).
- Un coût de mise en œuvre sur le projet considéré (compte tenu des efforts à fournir).
- Un engagement des parties prenantes impliquées (en particulier la direction de projet).
- Une équipe de BIM Management mobilisée très en amont du démarrage des études.

Dans la liste des objectifs proposés, il est préférable d'en choisir 2 ou 3 parfaitement atteignables plutôt que plusieurs qui seront traités :

- En partie seulement.
- Avec un indicateur de complétude peu élevé.

En effet, il faut suivre et évaluer ces objectifs par des indicateurs de performance

- Tout au long du projet.
- Dans chacune de ses grandes phases d'étude.

Le but est de vérifier leur niveau de complétude ou d'efficacité en vue de vérifier la mobilisation des contributeurs et de l'équipe de BIM Management.

Objectifs métiers des guides disponibles

Guides disponibles

Impact des exigences et de l'ingénierie système

Objectifs métiers du guide d'application BIM proposé par MINnD

Deux guides sont à considérer :

- Le guide convention BIM V2 de buildingSMART France (Fin 2018).
- Le guide d'application BIM du projet de MINnD (2019).

Les listes des objectifs métiers à traiter avec une démarche BIM de ces deux guides :

- Sont assez similaires.
- Adressent aussi bien le secteur du bâtiment que celui du génie civil.

La plupart des objectifs sont impactés par :

| | |
|---------------------------------|--|
| La gestion des exigences | C'est-à-dire la vérification que l'ouvrage réalisé est bien conforme aux besoins opérationnels exprimés. |
| L'ingénierie système | C'est-à-dire la prise en compte des systèmes composés d'éléments organiques. |

Le tableau suivant :

- Donne la liste des 45 objectifs métiers du guide d'application BIM proposé par MINnD.
- Détaille ceux qui sont concernés par l'ingénierie système.

Il serait donc intéressant de revoir la définition de chacun de ces objectifs en la complétant par une approche « gestion des exigences » et « ingénierie système » afin de faciliter leur traitement et leur validation.

Une approche est de s'attacher à certains cas d'usage particulièrement plébiscités et maîtrisés afin de démontrer la pertinence de cette méthodologie. Par exemple, ETU05 : Synthèse générale).

| | | Gestion exigences | Ingénierie Systèmes |
|---|--|-------------------|---------------------|
| BOP01 | Besoins opérationnels | X | |
| Objectifs (MOA) pour la programmation | | | |
| PRG01 | Connaissance du patrimoine existant | | X |
| PRG02 | Instruction et approbation du projet | X | X |
| PRG03 | Concertation et acceptabilité du projet | X | X |
| PRG04 | Elaboration du dossier de consultation MOE | X | X |
| Objectifs pour la conception (toutes phases) | | | |
| ETU01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConçu | X | X |
| ETU02 | Développement concourant des études multi-métiers (AVP/PRO/EXE/Méthodes) | X | X |
| ETU03 | Prise en compte des exigences de l'exploitant et du mainteneur | X | |
| ETU04 | Gestion de la temporalité du projet (séquençage, ouvrages temporaires) | | X |
| ETU05 | Synthèse générale, analyse et suivi des interfaces | | X |
| ETU06 | Production des métrés et des quantitatifs | | X |
| ETU07 | Maîtrise des coûts | | X |
| ETU08 | Alimentation des outils de simulation | | X |
| ETU09 | Revue de satisfaction des exigences de performance de l'ouvrage | X | X |
| ETU10 | Revue de satisfaction des exigences réglementaires de l'ouvrage | X | X |
| ETU11 | Revue de développement du projet (délai / coûts / moyens) | | |
| ETU12 | Revue des études techniques | X | X |
| ETU13 | Revue des études de phasage | | X |
| ETU14 | Gestion de configuration des variantes | X | X |
| ETU15 | Gestion des Ordres de Modification (Change Order) | | |
| ETU16 | Contrôle Externe / Contrôle Extérieur | X | X |
| ETU17 | Consolidation (MOA) de la définition des travaux à réaliser (pré-DCE) | X | X |
| ETU18 | Elaboration dossier de consultation des entreprises | X | X |
| Objectifs réalisation des travaux | | | |
| TVX01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConstruit | X | X |
| TVX02 | Suivi (MOA) de l'avancement et de la qualité de la réalisation | X | X |
| TVX03 | Développement et validation des dispositions constructives | X | X |
| TVX04 | Gestion du séquençage des opérations | | X |
| TVX05 | Gestion du séquençage de la préfabrication | | X |
| TVX06 | Production des plans PBE | | |
| TVX07 | Alimentation consignes de guidage des engins | | |
| TVX08 | Alimentation chantier & maîtrise du risque en réalisation | X | X |
| TVX09 | Logistique (hors site / sur site) | | X |
| TVX10 | Contrôle Externe / Contrôle Extérieur | X | X |
| TVX11 | Accessibilité et ergonomie du poste de travail | X | X |
| Objectifs livraison de l'ouvrage | | | |
| LIV01 | Documentation du TelQueReceptionné | X | X |
| LIV02 | Opérations préalables à la réception | X | X |
| LIV03 | Production des livrables et pièces graphiques | | X |
| LIV04 | Récolement | | X |
| LIV05 | Contrôle du TelQueConstruit | X | X |
| LIV06 | Alimentation DOE-DIUO | X | X |
| Objectifs exploitation-maintenance | | | |
| GEM01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueMaintenu | X | X |
| GEM02 | Optimisation des processus de l'exploitant et du mainteneur | X | X |
| GEM03 | Alimentation de la BD Patrimoine et des processus GMAO | X | X |
| GEM04 | Formation et Immersion | | |

Figure 36 : liste des objectifs métier (MINnD – guide application BIM)

II. CONCLUSION

Rappel du contenu du présent document

Concepts à retenir

Nous avons présenté dans le présent document plusieurs concepts fondamentaux de l'ingénierie système permettant de mieux structurer les données d'une maquette numérique. Ces concepts sont :

- L'ingénierie des exigences, leurs formalisations et leurs règles de rédaction.
- L'architecture système et la décomposition des systèmes en vues opérationnelle, fonctionnelle et organique et le cycle en V.
- Un métamodèle pour le développement de systèmes complexes.

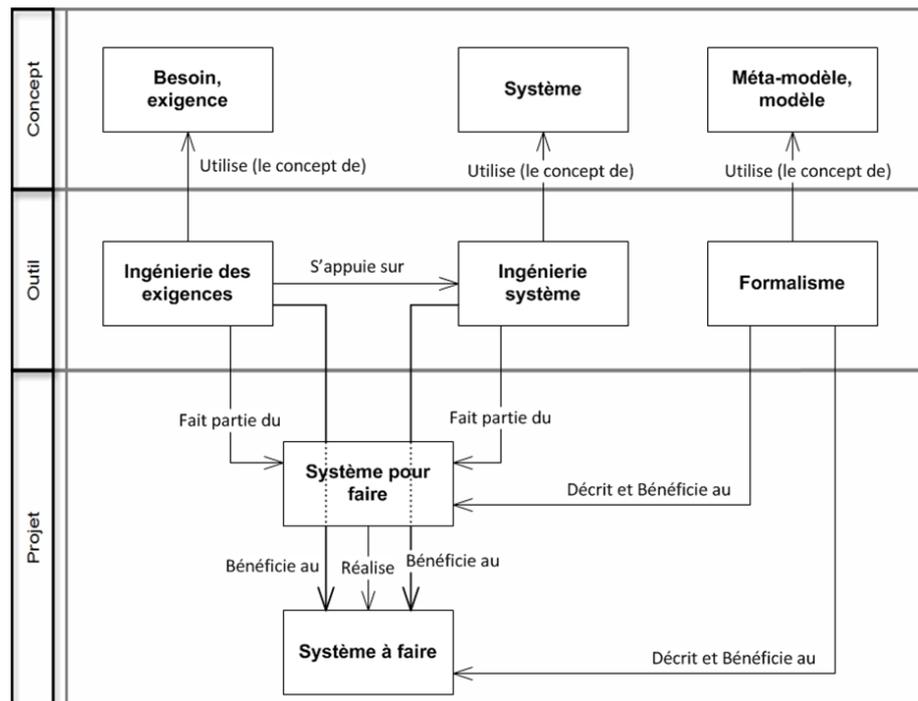


Figure 37 : application des concepts de l'ingénierie système au bénéfice d'un projet (Tolmer, 2016)

Outils permettant de modéliser et de gérer des exigences

Adaptation des concepts au domaine de la construction

Nous avons également présenté quelques outils permettant de modéliser et de gérer des exigences.

Nous avons cherché dans nos travaux à adapter ces concepts au domaine de la construction, plus précisément au domaine des infrastructures quand nécessaire.

Intégration de la notion d'espace...

Nous avons notamment fait des propositions pour intégrer une composante fondamentale dans tout projet de construction, à savoir l'« espace », mais aussi à l'architecture système et la « place » que cette dimension doit prendre dans le travail de conception des phases d'analyse du besoin à la définition de la solution.

... propositions d'adaptation du cycle en V

Nous avons également formulé deux propositions d'adaptation du cycle en V pour le domaine de la construction en y intégrant :

- La vérification des exigences en phase de conception grâce à la maquette numérique : le cycle en W.
- Les interactions entre « système à faire » et « système pour faire » : le double cycle en V.

**Cas d'usage :
planification de la
5^e ligne de métro de Lyon**

Enfin, nous avons testé comment appliquer certains de ces concepts sur un cas d'usage : la planification de la 5e ligne de métro de Lyon.

**Roadmap pour la saison 2
du projet MINnD**

**Alimentation et ajout
de cas d'usage**

Plusieurs éléments méritent d'être investigués dans la saison 2 du projet de recherche MINnD. Ces éléments sont décrits ci-après.

Dans le thème 1, une liste « exhaustive » de cas d'usage a été définie pour l'application du BIM dans les infrastructures.

Il faut étudier :

- Comment les approches présentées dans ce document permettent de les alimenter d'un point de vue méthodologique.
- S'ils permettent d'identifier de nouveaux éléments dans ces cas d'usage, voire d'amener à la définition de nouveaux cas d'usage complémentaires.

**Définition des standards
développés ou en cours
de développement**

Appliquer les concepts développés pour la définition des standards développés ou en cours de développement (IFC-bridge et IFC-tunnel notamment) pourrait aussi apporter un cadre théorique et méthodologique. Cela **permettrait une meilleure homogénéité et exhaustivité**.

**Complémentarité
entre BIM et SIG**

Un autre point à étudier et qui a été abordé dans ce document concerne la complémentarité entre BIM et SIG (système d'information géographique). Il apparaît nécessaire d'utiliser à la fois :

| | |
|-----------------------------|---|
| Les approches SIG... | ... pour modéliser les liens entre : <ul style="list-style-type: none"> • Le système à réaliser. • Son environnement. |
| Les approches BIM... | ... pour modéliser la composition et le fonctionnement interne du système. |

**Intégration de nos
conclusions et des
concepts développés**

Les questions auxquelles la prochaine saison de MINnD tentera de répondre sous le prisme des concepts d'ingénierie système présentés dans ce document sont :

- Comment garantir cette interopérabilité⁴ sans perdre d'information ?
- Quelles sont les informations ayant réellement besoin d'être échangées ?
- Quels sont les cas d'usage nécessitant une utilisation conjointe du BIM et du SIG ?
- Quelles sont les solutions actuelles pour utiliser des informations entre SIG et BIM (FME, PLCS) ?
- Sont-elles satisfaisantes ?
- Comment les améliorer ?

Il faut également veiller à intégrer :

- Les conclusions de nos recherches.
- Les concepts développés aux normes et éléments de standardisation en cours au niveau national et international. En effet, il est nécessaire d'appliquer les concepts développés dans ce document à des cas concrets. Cela permet de vérifier leur validité et leur applicabilité dans les projets à différents niveaux d'étude et sur différentes typologies d'ouvrage.

⁴ Définir l'interopérabilité : il ne s'agit pas de traduire d'un système dans un autre, mais permettre d'agréger les deux approches en garantissant la continuité.

12. ANNEXES

12.1. Annexe I : objectifs métiers et usages BIM pour le projet

Extrait du livrable MINnD
« Guide d'application BIM
du projet »

**Définition
d'objectif métier...**

Un objectif métier (ou cas d'usage métier) est un processus décrivant une activité de management d'un projet :

- Production des métrés et des quantitatifs.
- Revue de satisfaction des exigences de performance de l'ouvrage.
- Suivi de l'avancement du chantier.
- Synthèse.
- Etc.

Il s'agit d'un processus traditionnel d'un projet de construction, dont la portée est compréhensible par la direction de projet.

... d'usage BIM...

Un usage BIM (ou Procédé BIM) est un processus élémentaire utilisant des technologies numériques :

- Modélisation 3D.
- Étude variantes et gestion des configurations.
- Planification 4D.
- Contrôles automatiques pour suivi avancement.
- Etc.

Il s'agit d'un processus utilisé par les contributeurs au processus BIM, sous le contrôle de l'équipe de BIM Management.

... leur lien...

Les usages BIM doivent avoir pour objet de répondre aux objectifs métiers. Chaque objectif métier doit être nourri par autant d'usages BIM que nécessaire.

**... et leur classification
et numérotation**

Les objectifs métiers et usages BIM ont été classifiés et numérotés comme suit :

| | |
|--------------|--|
| PRGnn | Objectifs (MOA) pour la programmation. |
| ETUnn | Objectifs pour les études de conception (toutes phases). |
| TVXnn | Objectifs pour la réalisation des travaux. |
| LIVnn | Objectifs pour la livraison de l'ouvrage. |
| GEMnn | Objectifs pour la gestion-exploitation-maintenance. |
| BIMnn | Usages BIM clés. |

| PRG | Programmmation (MOA) | ETU | Conception (toutes phases) | TVX | Réalisation des travaux | LIV | Livraison de l'ouvrage | GEM | Exploitation-Maintenance | BIM | Usages BIM clés |
|-----|--|-----|--|-----|--|-----|---|-----|---|-----|---|
| 01 | Connaissance du patrimoine existant | 01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConçu | 01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConstruit | 01 | Documentation du TelQueRéceptionné | 01 | Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueMaintenu | 01 | Structuration des données |
| 02 | Instruction et approbation du projet | 02 | Développement concourant des études multi-métiers (AVP/PRO/EXE/Méthodes) | 02 | Suivi (MOA) de l'avancement et de la qualité de la réalisation | 02 | Opérations préalables à la réception | 02 | Optimisation des processus de l'exploitant et du mainteneur | 02 | Modélisation |
| 03 | Concertation et acceptabilité du projet | 03 | Prise en compte des exigences de l'exploitant et du mainteneur | 03 | Développement et validation des dispositions constructives | 03 | Production des livrables et pièces graphiques | 03 | Alimentation de la BD Patrimoine et des processus GMAO | 03 | Validation des données |
| 04 | Elaboration du dossier de consultation MOE | 04 | Gestion de la temporalité du projet (séquençage, ouvrages temporaires) | 04 | Gestion du séquençage des opérations | 04 | Règlement du TelQueConstruit | 04 | Formation et Immersion | 04 | Gestion des incohérences et des interférences |
| | | 05 | Synthèse générale, analyse et suivi des interfaces | 05 | Gestion du séquençage de la préfabrication | 05 | Alimentation DOE-DIUD | | | 05 | Génération des plans |
| | | 06 | Production des métrés et des quantitatifs | 06 | Production des plans BPE | | | | | 06 | Planification 4D |
| | | 07 | Maîtrise des coûts | 07 | Alimentation consignes de guidage des engins | | | | | 07 | Revue à l'aide du BIM |
| | | 08 | Alimentation des outils de simulation | 08 | Préparation chantier & maîtrise du risque en réalisation | | | | | | |
| | | 09 | Revue de satisfaction des exigences de performance de l'ouvrage | 09 | Logistique (hors site / sur site) | | | | | | |
| | | 10 | Revue de satisfaction des exigences réglementaires de l'ouvrage | 10 | Contrôle Externe / Contrôle Extérieur | | | | | | |
| | | 11 | Revue de développement du projet (délai / coûts / moyens) | 11 | Accessibilité et Ergonomie du poste de travail | | | | | | |
| | | 12 | Revue des études techniques | | | | | | | | |
| | | 13 | Revue des études de phasage | | | | | | | | |
| | | 14 | Gestion de configuration des variantes | | | | | | | | |
| | | 15 | Gestion des Ordres de Modification (Change Order) | | | | | | | | |
| | | 16 | Contrôle Externe / Contrôle Extérieur | | | | | | | | |
| | | 17 | Consolidation (MOA) de la définition des travaux à réaliser (pré-DCE) | | | | | | | | |
| | | 18 | Elaboration dossier de consultation des entreprises | | | | | | | | |

Figure 38 : liste des objectifs métiers et usages BIM pour le projet

13. TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|--|----|
| Figure 1 : exigences de « produit » et de « projet » adapté de Tolmer (2016)..... | 9 |
| Figure 2 : de l'importance d'une bonne gestion des exigences (Scott Adams, 1997)..... | 10 |
| Figure 3 : définition des exigences par vision | 12 |
| Figure 4 : regroupement des exigences en un diagramme (Badreau, S. et Boulanger, J.-L., 2014) et (Tolmer, 2016) | 12 |
| Figure 5 : cadre universel pour l'architecture de systèmes réels (Krob, 2009). Cette figure représente les 3 niveaux d'architecture système (opérationnel, fonctionnel, organique)..... | 20 |
| Figure 6 : « cube systémique » pour l'architecture d'un système (Krob, Élément de systémique. Architecture des systèmes., 2014) | 20 |
| Figure 7 : processus récursif d'analyse systémique et de modélisation (Krob, 2009)..... | 21 |
| Figure 8 : vues principales d'un système industriel (Fiorèse & Meinadier, 2012). Sur cette figure, sont également représentées les 3 vues architecturales différentes d'un système (en ligne) et les comportements du système en colonne. | 22 |
| Figure 9 : relations entre espace, objectifs, fonctions, activités et ressources (Mauger, 2015) | 25 |
| Figure 10 : analyse des besoins de mobilité dans le 5 ^e arrondissement de Lyon..... | 25 |
| Figure 11 : fonctions « Transporter des personnes » et « Accéder au système » de la 5e ligne de métro de Lyon pour les deux scénarios sélectionnés | 26 |
| Figure 12 : description organique (alignement) du tunnel de la 5 ^e ligne de métro de Lyon au niveau du système... 27 | 27 |
| Figure 13 : ajout de l'« espace » dans le « cube systémique ». L'espace est ajouté en tant que « comportement » du système, car il est perpendiculaire aux niveaux systémiques et aux vues architecturales. | 28 |
| Figure 14 : exigences opérationnelles, fonctionnelles et organiques avec leurs espaces alloués | 29 |
| Figure 15 : « système à faire », environnement opérationnel et « systèmes pour faire » (ISO/IEC/IEEE, 2015)..... | 31 |
| Figure 16 : relation entre l'IS, le « système à faire » et le « système pour faire » AFIS (2009)..... | 31 |
| Figure 17 : système humain et système technique impliqués dans un projet de système industriel (Krob, 2009) | 32 |
| Figure 18 : « système pour faire » et « système à faire » selon l'ISO 19650 (ISO, 2018)..... | 33 |
| Figure 19 : développement du cycle de vie du modèle en V (Forsberg & Mooz, 1992)..... | 34 |
| Figure 20 : partie gauche du cycle en V (International Council on Systems Engineering, 2015)..... | 35 |
| Figure 21 : côté droit du modèle du cycle en V (International Council on Systems Engineering, 2015)..... | 36 |
| Figure 22 : métamodèle du cycle en V appliqué au « système pour faire » | 38 |
| Figure 23 : double cycle en V..... | 39 |
| Figure 24 : analyse de constructibilité verticale dans le double cycle en V | 41 |
| Figure 25 : analyse de constructibilité horizontale et cycle en double V..... | 42 |
| Figure 26 : représentation de la loi MOP | 43 |
| Figure 27 : cycle en W dans le secteur de la construction (adapté du cycle en V) | 44 |
| Figure 28 : SysML, une adaptation d'UML 2 (OMG SysML, 2018)..... | 47 |
| Figure 29 : diagrammes SysML divisés en diagrammes de comportement, de structure et d'exigence (OMG SysML, 2018).. | 48 |
| Figure 30 : métamodèle IFC 4..... | 50 |
| Figure 31 : développement du métamodèle dans le modèle « IFC bridge »..... | 51 |
| Figure 32 : liaison avec le métamodèle IFC 4 | 52 |
| Figure 33 : liaison avec l'approche en W..... | 53 |
| Figure 34 : exigences spatiales | 53 |
| Figure 35 : application des concepts de « système à faire » et « système pour faire » (partie gauche) (Badreau, S. et Boulanger, J.-L., 2014) aux usages BIM (BIM uses dans cette figure) (Tolmer, 2016) | 57 |
| Figure 36 : liste des objectifs métier (MINnD – guide application BIM)..... | 59 |
| Figure 37 : application des concepts de l'ingénierie système au bénéfice d'un projet (Tolmer, 2016) | 60 |
| Figure 38 : liste des objectifs métiers et usages BIM pour le projet | 63 |

14. BIBLIOGRAPHIE

- AFIS (Association Française d'Ingénierie Système). (2009). Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. AFIS.
- ANSI/EIA 632. (1998). Processes for engineering a system.
- Badreau, S., & Boulanger, J. (2014). Ingénierie des exigences — Méthodes et bonnes pratiques pour construire et maintenir un référentiel. Dunod.
- CESAMES. (2017). CESAMES Systems Architecting Method, A Pocket Guide.
- Chen. (2018). BIM and Through-Life Information Management : A Systems Engineering Perspective. *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering* (pp. 137–146).
- Doran, & George. (1981). There's a S.M.A.R.T. way to describe way to write management's goals and objectives. *Management Review*.
- Dursun, P. (2012). Dialogue on space: Spacial codes and language of space. İstanbul Technical University, Faculty of Architecture, İstanbul, TURKEY: ITU A|Z.
- Feliot, C. (1997). Modélisation des systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles. Lille : Université de Lille.
- Fiorèse, S., & Meinadier, J.-P. (2012). Découvrir et comprendre l'ingénierie système. Paris : Cepaduès.
- Forsberg, K., & Mooz, H. (1992). The relationship of Systems Engineering to the Project Cycle. *Engineering Management Journal*, 36–43.
- Geyer. (2014). A Systems Engineering Methodology for Designing and Planning the built Environment – Results from the Urban Research Laboratory Nuremberg and their Integration in Education. *Systems*, www.mdpi.com/journal/systems.
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook*. Wiley.
- International Council on Systems Engineering. (2015). *Systems Engineering Handbook 4th Edition*. WILEY.
- ISO. (2015). ISO 9000:2015.
- ISO. (2017). ISO 10006:2017.
- ISO. (2018). ISO 19650-1:2018.
- ISO/IEC/IEEE. (2015). 15288:2015 Systems and software engineering – System life cycle processes. International Organization for Standardization.
- Krob, D. (2009). Éléments d'architecture des systèmes complexes. 20.
- Krob, D. (2014). Éléments de systémique. *Architecture des systèmes*. Paris: OpenEdition books – Collège de France.
- Mannion, M., & Keepece, B. (1995). SMART Requirements. Edinburgh, United Kingdom: Software Engineering Research Group Napier University Department of Mechanical, Manufacturing and Software Engineering.
- Matar. (2015). A systems engineering approach for realizing sustainability in infrastructure projects. *Housing and Building National Research Center HBRC Journal*.
- Mauger, C. (2015). Framework for integration of Services in Product requirements Definition Applied to Public Buildings. *École Nationale des Arts et Métiers*.
- Nuseibeh, B., & Easterbrook, S. (2000). Requirements Engineering: A Roadmap. *Proceedings of the conference on the future of Software engineering*, 35–46.
- OMGSysML. (2018, 02 11). WHats is SysML? Récupéré sur <http://www.omgsysml.org/what-is-sysml.htm>
- PLCS. (2019). http://docs.oasis-open.org/plcs/plcslib/v1.0/cs01/data/PLCS/concept_model/model_base.html.
- Pollet, Y. (2007). La démarche d'Ingénierie Système. Conservatoire National des Arts et Métiers — Chaire d'intégration des systèmes.
- Roques, P. (2009). SysML par l'exemple, un langage de modélisation pour systèmes complexes. Eyrolles.
- Standish Group. (2014). CHAOS report. Project SMART.

- Tolmer, C.-E. (2016). Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en oeuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets. Université Paris-Est.
- Voiron, C., & Chery, J.-P. (2005). Espace géographique, spatialisation et modélisation en Dynamique des Systèmes. 6ème Congrès européen des Sciences des Systèmes.
- Von Bertalanffy, L. (1968). Théorie générale des Systèmes. Traduit par Jean-Benoit Chabrol : Dunod.
- Weilkiens, T. (2006). Systems Engineering with SysML/UML, Modeling, Analysis, Design. Morgan Kaufman.
- Whyte, J. (2016). The future of systems integration within civil infrastructure: A review and directions for research. 26th annual INCOSE International Symposium.
- Wikipédia. (2019). Systems of Systems. Récupéré sur https://en.wikipedia.org/wiki/System_of_systems
- Wirth. (1985). Algorithms and Data Structures. Prentice Hall.
- Zave, P. (1997). Classification of research efforts in Requirements Engineering. AT&T Laboratory Murray Hill, New Jersey 07974, USA: AT&T inc.